



Compléments d'étude géothermique dans l'île de La Réunion (géologie, géochimie)

Bernard Sanjuan Sanjuan, Albert Genter, Michel Brach, David Lebon Octobre

► To cite this version:

Bernard Sanjuan Sanjuan, Albert Genter, Michel Brach, David Lebon Octobre. Compléments d'étude géothermique dans l'île de La Réunion (géologie, géochimie). [Rapport Technique] BRGM/RP-51189-FR, BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières). 2001, 196 p. hal-03359613

HAL Id: hal-03359613

<https://brgm.hal.science/hal-03359613>

Submitted on 30 Sep 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



DOCUMENT PUBLIC

Compléments d'étude géothermique dans l'île de La Réunion (géologie, géochimie)

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche Géothermie Réunion 2001-ENE-R06

octobre 2001
BRGM/RP-51189-FR





DOCUMENT PUBLIC

Compléments d'étude géothermique dans l'île de La Réunion (géologie, géochimie)

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche Géothermie Réunion 2001-ENE-R06

B. Sanjuan, A. Genter, M. Brach, D. Lebon

octobre 2001
BRGM/RP-51189-FR



Mots clés : Géothermie, La Réunion, Cilaos, Salazie, Plaine des Cafres, Plaine des Palmistes, Plaine des Sables, Piton des Neiges, Géologie structurale, Failles, Géochimie, Hydrothermalisme, Sources thermales, Eau, Gaz, Profils.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Sanjuan B., Genter A., Brach M., Lebon D. (2001) - Compléments d'étude géothermique dans l'île de La Réunion (géologie, géochimie). BRGM/RP-51189-FR, 196 p., 45 fig., 12 tabl., 8 ann.

© BRGM, 2001, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Cette étude, financée à la fois par le Conseil régional de La Réunion et la Direction de la Recherche du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM ; projet 01-ENE-R06), s'intègre dans le cadre plus général du projet Géothermie Réunion lancé par le Conseil régional de La Réunion. Elle fait suite à une première étape, qui avait consisté à réaliser une synthèse des travaux géoscientifiques antérieurs, présentée à la Région en août 2000.

Au vu des données existantes et des difficultés attendues dans l'exploration de réservoirs géothermiques à La Réunion, plusieurs travaux dans les domaines de la géologie structurale, de la géochimie des eaux et des gaz dans les sols ont été identifiés et ont été réalisés par le BRGM dans le cadre de cette étude.

L'objet de ce rapport est donc : (1) de présenter les principales observations et mesures récoltées sur le terrain durant la phase de reconnaissance réalisée en 2000, (2) de présenter les résultats de la campagne de profils de mesures de gaz dans les sols de juin 2001, (3) d'intégrer l'ensemble des résultats de prospection géothermique dans le contexte plus général du piton des Neiges avec la prise en compte des structures volcano-tectoniques et des nouvelles données sur la géochimie des fluides et des gaz, et enfin, (4) de proposer, à l'échelle des cirques, un modèle conceptuel qui rende compte des circulations hydrothermales potentielles, éléments de base au développement de la géothermie.

TRAVAUX DE GÉOLOGIE

Les compléments d'exploration géologique réalisés dans les cirques de Salazie et de Cilaos ont été focalisés sur la recherche de structures potentiellement favorables au développement d'un réservoir géothermique, et en particulier celles susceptibles de créer les conditions de perméabilité nécessaires. Les observations faites au cours de la campagne de terrain montrent que les structures géologiques prédominantes dans les cirques sont d'origine volcano-tectonique : dykes, sills, corps intrusifs de grande dimension. Les structures tectoniques franches sont quasiment absentes : failles, fractures et joints secs ou minéralisés.

Les observations faites sur le terrain et leur analyse permettent de faire un point nouveau sur la connaissance du massif du piton des Neiges et notamment sur le problème de la fracturation au sein de ce massif volcanique et des conditions de perméabilité en profondeur qui sont primordiales dans le développement d'un système hydrothermal.

Les dykes et les sills sont omniprésents dans le massif et constituent parfois l'essentiel des intrusions visibles à l'affleurement. L'analyse de leur distribution ainsi que leur orientation n'apporte pas de renseignement prépondérant sur la connaissance du

système hydrothermal actuel. En revanche, leur densité semble être un paramètre important à considérer. En effet, dans le secteur du Bras Rouge dans le cirque de Cilaos, la localisation des sources thermo-minérales et l'anomalie gaz maximale d'hélium mise en évidence par la cartographie des gaz se superpose à la zone à très forte densité d'intrusions.

Par contre, la présence des corps intrusifs de grande dimension est importante à considérer dans la mesure où il y a une relation spatiale entre ces corps intrusifs et la position des sources thermo-minérales. Ceci suggère que ces corps intrusifs, de par leur enracinement supposé dans le substratum des cirques, constituent des discontinuités privilégiées pour drainer les fluides hydrothermaux vers la surface. Ils pourraient également constituer des zones privilégiées de circulations de fluides en profondeur. Des inconnues subsistent encore cependant sur l'étendue de la perméabilité offerte par ces structures volcano-tectoniques.

Les structures tectoniques « franches » observées (failles, joints, fractures minéralisées) sont présentes en quantité très faible et ont une ampleur modérée. Cette faible intensité de la fracturation observable sur le terrain suggère donc qu'il n'y a pas eu de phase tectonique notable ayant affecté le massif du piton des Neiges, tout au moins au cours de son histoire géologique récente. L'autre conclusion importante qui en découle est que la fracturation tectonique n'est sans doute pas un vecteur de perméabilité importante au sein du substratum des cirques.

TRAVAUX DE GÉOCHIMIE DES EAUX

De nombreuses données géochimiques ayant été acquises dans le passé, les principaux objectifs recherchés dans cette étude ont été :

- l'analyse critique et la validation des données antérieures ;
- l'acquisition d'informations supplémentaires en réalisant de nouveaux types d'analyses (éléments traces particuliers, isotopes) ou en cherchant de nouvelles sources thermales, de manière à compléter les travaux antérieurs et à accroître la probabilité d'identifier un réservoir géothermique à partir d'investigations de surface. En outre, ces travaux ont permis de mieux définir et caractériser l'origine, la circulation et l'acquisition du chimisme des fluides du système hydrothermal déjà reconnu.

Comme l'indique l'étude de synthèse des données géologiques et géochimiques antérieures réalisée par le BRGM en 2000, l'essentiel des sources thermales de l'île de La Réunion est confiné dans les cirques du piton des Neiges (principalement, Salazie et Cilaos). Seize sources constituant la majorité des sources thermales connues des cirques de Salazie et de Cilaos, ainsi que cinq eaux superficielles de référence (rivière, ravine, pluie), ont été échantillonnées entre le 17 et le 27 octobre 2000 pour réaliser les analyses des espèces majeures, traces et infratraces ainsi que des analyses isotopiques. Seul un échantillon de gaz (gaz libre associé à la source Irénée de l'établissement thermal de Cilaos) a été collecté pour son analyse chimique.

Toutes les sources se situent au bord de rivières (Mât, Bras Rouge, Bras Benjoun) ou de ravines (Olivette, Bachelier, Grand Sable, Fouquet, Pissa...). La plupart se caractérise par de faibles débits (suintements, parfois).

Excepté l'eau de la source ravine Olivette, qui est la plus minéralisée (≈ 5 g/l) et montre un chimisme particulier (faciès bicarbonaté chloruro-sodique), toutes les autres eaux thermales ont une minéralisation moyennement élevée (de 1 à 3 g/l) et sont caractérisées par un faciès à dominante bicarbonaté sodique ou calco-sodique, qui résulte du contact de ces eaux avec le basalte et des émanations de CO_2 d'origine magmatique. Les concentrations en calcium et en magnésium semblent être contrôlées en profondeur par la solubilité de la calcite et de la dolomite désordonnée. D'après la position de ces eaux sur le diagramme ternaire $\text{Cl-HCO}_3\text{-SO}_4$ de Giggenbach (1991), elles font partie du groupe d'eaux thermales classées comme des eaux périphériques, en bordure d'un gisement géothermal. Pour ce type d'eaux qui possèdent des températures basses à moyennement élevées et qui ont tendance à être assez réactives au cours de leur remontée, les géothermomètres chimiques doivent être appliqués avec beaucoup de précaution. La présence d'un gisement de vapeur naturelle n'étant pas mise en évidence, ce qui est en bon accord avec les faibles concentrations en ammonium déterminées dans les eaux thermales, les concentrations en sulfates, qui sont parfois élevées, proviendraient plutôt de processus d'interaction avec la roche que d'émanations de H_2S , associées à la vapeur.

Les valeurs du rapport Cl/B, comprises entre 10 et 100 (concentrations exprimées en mg/l), permettent de classer les eaux thermales en quatre groupes et suggèrent une appartenance de ces eaux à des réservoirs souterrains différents. Les diagrammes tels que Cl-B, Cl-Na et Cl-Li indiquent l'existence de processus de mélange entre certaines eaux thermales et des eaux superficielles froides, notamment dans le cirque de Salazie.

PROFILS DES MESURES DE GAZ DANS LES SOLS

L'analyse dans les sols de certains gaz libres tels que l'oxygène, l'azote, le dioxyde de carbone, l'argon, l'hélium et le radon, permet de détecter des anomalies de fuite associées à des discontinuités structurales dans la croûte terrestre (failles, points d'émission magmatiques et de fumerolles) et à des flux d'énergie. Cette méthode présente donc un intérêt tout particulier pour la prospection géothermique. Au cours de la campagne de mesures effectuée du 21 juin au 5 juillet 2001, onze profils ont été réalisés sur cinq grandes zones, à savoir : le cirque de Salazie, la plaine des Sables associée au volcan du piton de La Fournaise, les plaines des Palmistes et des Cafres et enfin, le cirque de Cilaos. La longueur des profils et le pas de mesure varient suivant les zones étudiées. Conjointement à ces analyses, des mesures de carbone-13 ont été réalisées sur quatre points.

L'examen approfondi des résultats permet de mettre en évidence que :

- les profils effectués sur les sites Anciens Thermes d'Hell-Bourg, ravine Olivette, camp Pierrot, Trou Blanc, plaine des Sables et rivière du Bras Rouge ne montrent pratiquement aucun indice majeur de fuites d'origine profonde ;

- les concentrations en He les plus élevées (6,26 et 7,75 ppm), qui sont de l'ordre de grandeur des anomalies observées dans les sols de cratères volcaniques sub-actifs (10 ppm ; par exemple, Soufrière, en Guadeloupe, ou Vulcano, en Italie), ont été observées dans la région de Cilaos (route d'Ilet à Cordes). Les anomalies les plus importantes en CO₂ (17, 21 et 31 %) et celles parmi les plus élevées en radon (240 et 605 pCi/l) y ont également été détectées. La signature isotopique en carbone-13 de l'échantillon de gaz prélevé pourrait résulter d'un mélange entre des émanations de CO₂ d'origine magmatique et de CO₂ provenant de décarbonatation de carbonates marins ;
- une anomalie de méthane, détectée près d'un tunnel creusé dans une coulée de basalte, dans le profil n° 7 (plaine des Palmistes), sur la bordure sud du piton des Neiges, est associée, aux alentours, à des teneurs en CO₂ et en radon relativement importantes. Ceci devrait accroître l'intérêt de cette zone, qui est située entre les deux massifs volcaniques (piton des Neiges - piton de La Fournaise). La valeur isotopique en carbone-13 de l'échantillon de gaz prélevé au cours de la réalisation de ce profil, semble témoigner d'une origine mixte de cette espèce, à la fois biogénique et magmatique mais avec une prédominance de l'origine biogénique. Pour valider ce résultat, des mesures de carbone-13 supplémentaires seraient nécessaires sur ce point et les points voisins, qui indiquaient des teneurs anormales en CO₂ et en radon ;
- le profil n° 9 (plaine des Cafres), situé également entre les deux édifices volcaniques, où les teneurs les plus élevées en radon (jusqu'à 820 pCi/l) ont été systématiquement observées, mérite une attention toute particulière. Ces valeurs, qui sont comparables à celles trouvées dans certaines zones de la plaine du Lamentin, en Martinique, ou au pied du volcan Vulcano, ne sont pas associées à des teneurs spécialement fortes en CO₂ ou en He. Il se pourrait que des nappes d'eaux superficielles masquent les teneurs élevées en CO₂ et en He par dispersion de ces gaz (diffusion latérale) ;
- les sols autour des sources thermales n'indiquent pas d'anomalies particulières (sources thermales de la ravine Olivette, par exemple). Ceci est probablement causé par la fuite préférentielle des gaz par l'émergence des sources thermales.

Les résultats obtenus sur toutes ces zones devront être confrontés aux données issues des études de géophysique afin d'examiner si des convergences existent et peuvent mettre en évidence des zones potentiellement favorables à la géothermie. Des mesures complémentaires (plus d'analyses isotopiques en carbone-13, par exemple) et des profils de gaz plus resserrés, perpendiculaires et avec un quadrillage plus important, mériteraient d'être réalisés sur des sites tels que route d'Ilet à Cordes, plaine des Palmistes et plaine des Cafres.

PROPOSITION D'UN MODÈLE CONCEPTUEL DE CIRCULATION DES FLUIDES HYDROTHERMAUX DANS LA PARTIE CENTRALE DU MASSIF DU PITON DES NEIGES

La convergence des observations faites de part et d'autre du piton des Neiges incite à rechercher un modèle général pour l'origine des fluides hydrothermaux dans les cirques rendant compte de l'association spatiale entre corps intrusifs de grande dimension et émergences thermo-minérales et des caractéristiques géochimiques de ces fluides.

Les données géochimiques obtenues au cours de cette étude ont non seulement permis de valider certains des résultats antérieurs mais ont contribué aussi à mieux définir l'origine, la circulation et l'acquisition du chimisme des fluides. Ainsi, d'après les valeurs en deutérium et en oxygène-18 ainsi que le gradient isotopique d'altitude moyen de -0,30 m/100 m, établi pour l'oxygène-18, on peut conclure que les eaux thermales des cirques de Salazie et de Cilaos sont des eaux d'origine météorique, qui s'infiltrent, pour la plupart, dans la partie sommitale du piton des Neiges. L'absence d'enrichissement net en oxygène-18 observé sur les eaux thermales ne suggère pas d'échanges à haute température entre ces eaux et les basaltes.

D'après des calculs d'indices de saturation des eaux vis-à-vis de certains minéraux réalisés au moyen du code géochimique EQ3NR et les résultats obtenus à l'aide des géothermomètres chimiques, ces eaux seraient, ensuite, réchauffées, en profondeur, par des émanations gazeuses, essentiellement constituées de CO₂ d'origine magmatique à des températures pouvant aller jusqu'à 120-130 °C et en tout état de cause, à moins de 150 °C. Les températures profondes estimées ainsi que les pressions partielles de CO₂ minimales calculées à l'émergence des sources, sont relativement plus importantes dans le cirque de Cilaos (T de l'ordre de 70 à 130 °C ; P_{CO₂} de 0,4 à 7,6 bar) que dans celui de Salazie (T de l'ordre de 40 à 100 °C ; P_{CO₂} de 12,2 mbar à 2,1 bar). Le léger enrichissement en oxygène-18 observé pour les eaux de Cilaos par rapport à celles de Salazie ainsi que la signature isotopique en strontium plus proche de celle des basaltes pour les eaux de Cilaos (0,70420) semblent confirmer ces différences. La sous-saturation des eaux thermales, estimées comme les plus chaudes en profondeur (Aval Sentier Taïbit, Irénée, ravine Olivette), vis-à-vis de minéraux comme l'albite, le feldspath potassique et la muscovite et leur saturation avec les smectites (minéraux argileux), tendent plutôt à confirmer les valeurs relativement faibles trouvées pour les températures profondes.

Le forage de Salazie SLZ1 montre que les conditions de température en profondeur suggérées par la composition chimique des eaux thermales des cirques (120-130 °C) peuvent être atteintes vers 1 000-1 500 m de profondeur environ, dans l'hypothèse d'un régime thermique conductif dominant. Le système hydrothermal à l'origine des eaux thermales serait donc relativement superficiel. Il semble donc cohérent de proposer que les corps intrusifs sont suffisamment enracinés en profondeur pour drainer les fluides vers la surface, expliquant ainsi le positionnement des sources à leur contact ou à proximité.

Après un long temps de circulation, depuis son infiltration (au moins, plus de 50 ans d'après les analyses de tritium), l'eau thermale remonte à la faveur de discontinuités structurales en se refroidissant et en dégageant du CO₂ peu avant ou à l'émergence des sources. Ce dégagement de CO₂, qui fait remonter le pH de la solution, ainsi que le changement d'état d'oxydo-réduction de l'eau, peuvent provoquer la précipitation de calcite, smectites et oxy-hydroxydes de fer, comme cela est observé à l'émergence de nombreuses sources thermales. Les processus de mélange avec des eaux superficielles semblent beaucoup plus fréquents dans le cirque de Salazie (surtout, au niveau de la rivière du Mât) que dans celui de Cilaos, où ils sont très peu nombreux. Ceci s'explique assez facilement si on compare le régime de pluviosité de chacun des cirques, étant

donné que les précipitations dans le cirque de Cilaos sont moins nombreuses que dans celui de Salazie.

Ce modèle de circulation des fluides, à l'échelle des cirques, ne permet malheureusement pas de préjuger de l'importance de la perméabilité. Elle est apparemment plus élevée en bordure et au sein de la structure caldérique que dans les cirques, mais il est difficile de conclure à ce stade qu'elle est suffisante pour le développement d'un réservoir géothermique. Dans le puits SLZ1 situé en dehors de la structure caldérique, la perméabilité est apparue très faible. Les indices les plus favorables (température des fluides, cartographie des gaz, géométrie des corps intrusifs) sont observés dans le secteur du Bras Rouge, dans le cirque de Cilaos. Ceci est probablement à mettre en relation avec le fait que les dernières manifestations volcaniques du piton des Neiges sont localisées dans ce secteur du Rond du Bras Rouge, avec des remontées de gaz profonds chauds et un gradient thermique conductif plus élevés.

Quant à la possibilité de trouver un système hydrothermal plus profond et à haute température ($> 200\text{ }^{\circ}\text{C}$), la principale inconnue réside dans la prolongation vers le bas de ce système hydrothermal superficiel. D'après les informations du forage SLZ1, l'isotherme $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ se situerait vers 2 300 m de profondeur, en considérant toujours un régime thermique conductif. Aucun indice de fluide minéralisé et équilibré sous ces conditions de température élevées n'a été rencontré. L'enracinement des corps intrusifs, évoqué pour expliquer la remontée des fluides du système hydrothermal superficiel n'est pas contraint à cette profondeur. L'absence de tectonique récente de grande ampleur et permettant de réactiver ou de créer des drains perméables en profondeur est sans nul doute aussi un facteur limitant pour la perméabilité.

En conclusion, la présence d'un système hydrothermal superficiel de moyenne température, localisé au sein de la caldeira récente du piton des Neiges, apparaît comme probable et cohérente avec les données géologiques et géochimiques récoltées au cours de cette étude. Par contre, la présence d'un système plus profond, combinant à la fois des conditions de température élevée ($> 200\text{ }^{\circ}\text{C}$) et de perméabilité requises pour le développement d'un réservoir géothermique haute enthalpie n'est pas étayée. Seule l'existence de conditions de température élevées semble être établie.

Des orientations et propositions de travaux pour le futur sont présentées par le BRGM en fin de rapport.

Sommaire

1. Introduction	15
1.1. Problématique.....	15
1.2. Contexte et déroulement de l'étude	15
1.3. Principaux objectifs de l'étude	16
2. Etude géologique.....	17
2.1. Méthodologie mise en œuvre	17
2.2. Travaux réalisés dans le cirque de Salazie	17
2.2.1. Site Salazie 1 : ravine Olivette-rivière du Mât	18
2.2.2. Site Salazie 2 : rivière du Mât	21
2.2.3. Site Salazie 3 : ravine Grosse Roche.....	23
2.2.4. Site Salazie 4 : rivière des Fleurs Jaunes.....	23
2.2.5. Site Salazie 5 : source Manouilh	28
2.2.6. Site Salazie 6 : rivière du Mât-Trou Blanc	30
2.2.7. Site Salazie 7 : camp Pierrot-Grand Sable	32
2.3. Travaux réalisés dans le cirque de Cilaos.....	32
2.3.1. Site Cilaos 1 : route d'Ilet à Cordes.....	33
2.3.2. Site Cilaos 2 : GR2 Cilaos-rivière du Bras Rouge	40
2.3.3. Site Cilaos 3 : Bras-Rouge-La Chapelle.....	44
2.3.4. Site Cilaos 4 : route N5 Cilaos-Saint-Louis	50
2.4. Caractérisation des dépôts hydrothermaux.....	51
2.4.1. Matériel et méthodes	51
2.4.2. Minéraux analysés	53
2.5. Le massif du piton de la Fournaise.....	54
2.5.1. Les traits structuraux majeurs du volcan actif.....	54
2.5.2. La fracturation du volcan.....	56
2.5.3. Le système hydrothermal	57
2.6. Analyse structurale	58
2.6.1. Rappel des données existantes dans les cirques d'après la bibliographie	58
2.6.2. Données nouvelles de fracturation dans les cirques apportées par cette étude	62
2.6.3. Relation entre fracturation et hydrothermalisme	66

2.7. Interprétation	69
2.7.1. Le rôle des différentes structures tectoniques et techno-tectoniques	69
2.7.2. La recherche d'un modèle conceptuel de la circulation hydrothermale dans la partie centrale du massif du piton des Neiges.....	70
2.8. Conclusions	71
3. Etude géochimique	75
3.1. Eaux des sources thermales de Salazie et de Cilaos.....	75
3.1.1. campagne d'échantillonnage et de mesures sur site (du 17 au 27/10/2000) ..	75
3.1.2. Analyses chimiques et isotopiques des échantillons	83
3.1.3. Interprétation des résultats et discussion	86
3.2. profils de mesures de teneurs en gaz dans les sols	112
3.2.1. Intérêt de la méthodologie utilisée	112
3.2.2. campagne de mesures (21 juin-5juillet 2001)	113
3.2.3. Interprétation des résultats et discussion	115
4. Conclusion	121
5. Perspectives de développement de la géothermie à la Réunion et recommandations.....	125
5.1. Dans les cirques du piton des Neiges	125
5.2. Dans les autres entités géologiques de l'île de La Réunion	125
Bibliographie.....	127

Liste des figures

Fig. 1 - Carte des stations d'observations réalisées dans le cirque de Salazie.....	18
Fig. 2 - Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des dykes (A, B) et des joints (C, D) de la station 2 de la ravine Olivette-rivière du Mât, cirque de Salazie	20
Fig. 3 - Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des joints (A, B) de la rivière du Mât, cirque de Salazie ...	22
Fig. 4 - Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des dykes (A, B) et des joints (C, D) de la station 1 de la rivière des Fleurs Jaunes, cirque de Salazie	25
Fig. 5 - Profil de fractures relevées sur la dalle de lave massive au niveau du radier de la D52. Affleurements de la station 1 de la rivière des Fleurs Jaunes, cirque de Salazie	26

Fig. 6 -	Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des dykes (A, B) et des joints (C, D) des stations 3 et 4 de la rivière des Fleurs Jaunes, cirque de Salazie	27
Fig. 7 -	Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des dykes (A, B) et des joints (C, D) de la source Manouilh, cirque de Salazie	29
Fig. 8 -	Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des dykes (A, B) et des joints (C, D) de la rivière du Mât, Trou Blanc, cirque de Salazie	31
Fig. 9 -	Carte des stations d'observations réalisées dans le cirque de Cilaos.....	33
Fig. 10 -	Profils de fractures relevées dans le cirque de Cilaos. Affleurements jalonnant la route d'Ilet à Cordes . A : station 1, B : station 4, C : station 5, D : station 7.....	34
Fig. 11 -	Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des dykes (A, B) et des joints (C, D) de la station 1 de la route d'Ilet à Cordes, cirque de Cilaos	35
Fig. 12 -	Rosaces et projections stéréographiques dans hémisphère de Schmidt inférieur des dykes (A, B) et des joints (C, D) des stations 2 à 5 de la route d'Ilet à Cordes, cirque de Cilaos	37
Fig. 13 -	Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des dykes (A, B), et des joints (C, D) des stations 6 à 7 de la route d'Ilet à Cordes, cirque de Cilaos	38
Fig. 14 -	Profils de fractures relevées dans le cirque de Cilaos. Le Pain de Sucre, route d'Ilet à Cordes, station 11. A : partie sud , B : partie centrale, C : partie W	39
Fig. 15 -	Rosace et projection stéréographique dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des joints (A, B) de la station 11 de la route d'Ilet à Cordes, cirque de Cilaos	40
Fig. 16 -	Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des dykes (A, B) et des joints (C, D) de la station 3 de la rivière du Bras Rouge, source Aval Sentier du Taïbit, cirque de Cilaos.....	42
Fig. 17 -	Profils de fractures relevées dans le cirque de Cilaos dans la rivière Bras Rouge, A : station de la Cascade , B : aval de la Chapelle, C : intrusion basique sud de la Chapelle.....	43
Fig. 18 -	Rosace et projection stéréographique dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des joints (A, B) des stations 4 et 5 de la cascade de la rivière du Bras Rouge, cirque de Cilaos.....	44
Fig. 19 -	Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des dykes (A, B), des joints (C, D) et des failles (E, F) des stations 3 et 4 de la rivière du Bras Rouge, la Chapelle, cirque de Cilaos.....	48
Fig. 20 -	Rosace et projection stéréographique dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des joints (A, B) de la station 7 de la rivière du Bras Rouge, sud de la Chapelle, cirque de Cilaos	49
Fig. 21 -	Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des dykes (A, B) et des failles (C, D) de la station 1 de la route N5 Saint-Louis, cirque de Cilaos	51

Fig. 22 - Localisation des échantillons analysés par diffraction de Rayons X dans les cirques de Salazie et Cilaos.....	53
Fig. 23 - Les grandes structures concentriques du piton de la Fournaise et sa fracturation associée	55
Fig. 24 - Fracturation de la zone sommitale du volcan de la Fournaise (Stieltjes, 1986)	56
Fig. 25 - Interprétation des structures volcano-structurales du piton de la Fournaise (Stieltjes, 1986)	57
Fig. 26 - Coupe interprétative de la structure interne du piton de La Fournaise d'après des mesures géophysiques (Lénat <i>et al.</i> , 2000).....	58
Fig. 27 - Carte des intrusions dans les cirques de Salazie et Cilaos	61
Fig. 28 - Carte des dykes dans les cirques de Salazie et Cilaos.....	64
Fig. 29 - Carte des joints dans les cirques de Salazie et Cilaos	65
Fig. 30 - Carte des failles dans les cirques de Salazie et Cilaos	67
Fig. 31 - Carte des remplissages dans les cirques de Salazie et Cilaos	68
Fig. 32 - Section verticale interprétative à travers les cirques de Salazie et de Cilaos. Les corps intrusifs mis en place en bordure de la caldéra récente constitueraient les principales discontinuités pour la circulations des fluides en profondeur	72
Fig. 33 - Carte de localisation des points d'eau (sources thermales + eaux de surface) prélevés au cours de la campagne d'octobre 2000 dans les cirques de Salazie et de Cilaos (île de La Réunion).....	76
Fig. 34 - Diagramme ternaire Cl-HCO ₃ -SO ₄ (d'après Giggenbach (1991)) dans lequel ont été reportées les eaux thermales des cirques de Salazie (ronds bleus) et de Cilaos (carrés rouges).....	90
Fig. 35 - Diagrammes binaires représentant les concentrations en bromures, sodium, bore et lithium en fonction de celles en chlorures analysées dans les eaux thermales des cirques de Salazie (ronds bleus) et de Cilaos (carrés rouges).....	91
Fig. 36 - Diagrammes binaires représentant les concentrations en potassium, sulfates, calcium, magnésium, bicarbonates et silice dissoute en fonction de celles en sodium analysées dans les eaux thermales des cirques de Salazie (ronds bleus) et de Cilaos (carrés rouges).....	93
Fig. 37 - Diagramme binaire représentant les concentrations en magnésium en fonction de celles en calcium ainsi que diagrammes binaires représentant les concentrations en calcium et en magnésium en fonction de celles en bicarbonates analysées dans les eaux thermales des cirques de Salazie (ronds bleus) et de Cilaos (carrés rouges).....	94
Fig. 38 - Diagramme binaire représentant les teneurs en deutérium en fonction de celles en oxygène-18 des eaux thermales des cirques de Salazie (ronds bleus) et de Cilaos (carrés rouges) ainsi que de quelques eaux superficielles (rivières, ravines, pluies) prélevées dans ces cirques. Toutes les eaux thermales des cirques sont situées entre les deux droites, ce qui indique leur origine météorique. Les deux points qui se détachent (en haut de la figure, à droite) correspondent à deux eaux de pluie prélevées dans des flaques, qui ont probablement subi (surtout pour celle de Salazie) un léger processus d'évaporation.....	97

Fig. 39 - Diagramme binaire représentant les rapports isotopiques en strontium en fonction des rapports Li/Cl (concentrations exprimées en $\mu\text{g/l/mg/l}$) mesurés sur les eaux thermales des cirques de Salazie (ronds bleus) et de Cilaos (carrés rouges).....	101
Fig. 40 - Diagramme binaire représentant les teneurs en oxygène-18 des sulfates dissous en fonction de celles en oxygène-18 de l'eau, mesurées sur les eaux thermales de Salazie (ronds bleus) et de Cilaos (carrés rouges).....	101
Fig. 41 - Diagramme ternaire Na-K-Mg (d'après Giggenbach (1988)) appliqué aux eaux thermales des cirques de Salazie et de Cilaos.....	108
Fig. 42 - Diagramme binaire représentant les concentrations en lithium en fonction de celles en sodium; analysées dans les eaux thermales des cirques de Salazie (ronds bleus) et de Cilaos (carrés rouges).....	110
Fig. 43 - Diagrammes binaires représentant les teneurs en hélium (He), radon (Rn) et méthane (CH_4) en fonction de celles en dioxyde de carbone (CO_2) et diagramme binaire représentant les teneurs en hélium en fonction de celles en radon, mesurées sur les échantillons de gaz dans les sols au cours de la campagne réalisée au mois de juin-juillet 2001 dans différentes zones de l'île de La Réunion. Les teneurs en CO_2 et CH_4 sont exprimées en % de volume, les teneurs en He en ppm et les teneurs en Rn en pCi/l.....	116
Fig. 44 - Mesures des teneurs en CO_2 et en He (ppm) des gaz dans les sols obtenues au cours de la réalisation du profil n°9 (route Ilet à Cordes).....	118
Fig. 45 - Section verticale NS à travers les cirques de Salazie et Cilaos, qui illustre un système hydrothermal superficiel de moyenne température à partir des observations effectuées au cours de cette étude.....	121

Liste des tableaux

Tabl. 1 - Caractéristiques des 8 échantillons analysés par diffraction de rayon X.....	52
Tabl. 2 - Minéraux mis en évidence par diffraction de rayons X. La phase dominante a été surlignée en gras.....	54
Tabl. 3 - Familles directionnelles (① majeure, ② secondaire) des linéaments photo géologiques et des réseaux de dykes dans les cirques de Salazie et Cilaos d'après la littérature.....	60
Tabl. 4 - Prélèvements d'échantillons d'eau et mesures physico-chimiques réalisés sur site au cours de la campagne d'échantillonnage effectuée en octobre 2000 dans le cirque de Salazie (île de La Réunion).....	80
Tabl. 5 - Prélèvements d'échantillons d'eau et mesures physico-chimiques réalisés sur site au cours de la campagne d'échantillonnage effectuée en octobre 2000 dans le cirque de Cilaos (île de La Réunion).....	81
Tabl. 6 - Résultats des analyses chimiques des eaux prélevées au cours de la campagne d'échantillonnage des sources thermales des cirques de Salazie et de Cilaos, réalisée en octobre 2000.....	84

Tabl. 7 - Résultats des analyses chimiques des eaux prélevées au cours de la campagne d'échantillonnage des sources thermales des cirques de Salazie et de Cilaos, réalisée en octobre 2000 (fin).....	85
Tabl. 8 - Résultats de l'analyse chimique des gaz prélevés sur la source thermique Irénée (cirque de Cilaos) en octobre 2000.....	87
Tabl. 9 - Résultats des analyses isotopiques des eaux prélevées au cours de la campagne d'échantillonnage des sources thermales des cirques de Salazie et de Cilaos, réalisée en octobre 2000 (fin).....	88
Tabl. 10 - Calcul des indices de saturation (IS) des eaux de certaines sources thermales de Salazie vis-à-vis de quelques minéraux, réalisés au moyen du code géochimique EQ3NR.....	103
Tabl. 11 - Calcul des indices de saturation (IS) des eaux de certaines sources thermales de Cilaos vis-à-vis de quelques minéraux, réalisés au moyen du code géochimique EQ3NR.....	104
Tabl. 12 - Estimation des températures en profondeur à partir des géothermomètres chimiques et isotopiques pour les eaux thermales des cirques de Salazie et de Cilaos.....	109

Liste des annexes

Ann. 1 - Mesures structurales relevées dans le cirque de Salazie.....	133
Ann. 2 - Mesures structurales relevées dans le cirque de Cilaos.....	139
Ann. 3 - Position des sites d'observations et de mesures dans les cirques de Salazie et Cilaos, piton des Neiges.....	151
Ann. 4 - Conditionnement des échantillons d'eau prélevés au cours de la campagne d'échantillonnage des eaux thermales des cirques de Salazie et de Cilaos, réalisée en octobre 2000.....	159
Ann. 5 - Evolution de la composition chimique, en fonction du temps, des eaux des sources thermales des cirques de Salazie et de Cilaos	163
Ann. 6 - Procédures d'analyses des gaz (CO ₂ , CH ₄ , O ₂ , He, Rn) dans les sols.....	167
Ann. 7 - Carte de situation des onze profils de mesures des teneurs en gaz dans les sols réalisés en juin-juillet 2001.....	173
Ann. 8 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques des gaz dans les sols obtenus au cours de la campagne de profils de mesures réalisée en juin-juillet 2001	183

PHOTOGRAPHIES

Photo. 1 - Emergences au mur d'un dyke intrudant la microsyénite, la Chapelle, cirque de Cilaos.....	46
Photo. 2 - Faille décrochante ayant un rejet horizontal de 30 cm, aval la Chapelle, cirque de Cilaos.....	47

1. Introduction

1.1. PROBLÉMATIQUE

Le Conseil régional de La Réunion a souligné la nécessité de développer toutes les sources d'énergies renouvelables dans cette île, dont la géothermie. Malgré un premier échec dans la mise en évidence d'une ressource géothermique haute enthalpie au cours de la période 1978-1985, le Conseil régional a souhaité que les travaux de recherche soient relancés dans ce domaine. L'île de La Réunion, qui possède un des volcans les plus actifs du monde, mérite de faire à nouveau l'objet de travaux de recherche visant à mettre en évidence une ressource géothermique pouvant être utilisée pour la production d'électricité ou pour des usages directs. Cette démarche est d'autant plus justifiée que le forage profond réalisé dans le cirque de Salazie en 1986 avait démontré l'existence de conditions de températures proches de 190 °C à 2 100 m de profondeur.

La synthèse des travaux antérieurs, établie par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) en 2000, montre que la connaissance scientifique, au sens large, des deux massifs volcaniques de La Réunion a progressé depuis 1986, mais reste encore insuffisante pour pouvoir évaluer de manière satisfaisante leur potentiel géothermique. Il convient d'adopter une approche individualisée de ces deux massifs dans la mesure où les problèmes rencontrés sont spécifiques. Dans le cadre de ce projet et dans un premier temps, la zone d'intérêt sélectionnée a été celle du piton des Neiges (cirques de Salazie et de Cilaos), où la présence d'une source de chaleur a été confirmée par le forage profond de Salazie (190 °C à environ 2 100 m de profondeur). En marge de cette zone, des profils de mesures de gaz dans les sols ont également été réalisés sur les plaines des Sables, des Palmistes et des Cafres.

1.2. CONTEXTE ET DÉROULEMENT DE L'ÉTUDE

Cette étude, financé à la fois par le Conseil régional de La Réunion et la Direction de la Recherche du BRGM (projet 01-ENE-R06), s'intègre dans le cadre plus général du projet Géothermie Réunion lancé par le Conseil régional de La Réunion. Elle fait suite à une première étape, qui avait consisté à réaliser une synthèse des travaux géoscientifiques antérieurs et qui s'est terminée en septembre 2000.

Cette étude s'est déroulée sur un an avec deux phases distinctes :

- une première phase d'acquisition des données de terrain complémentaires en géologie structurale et en géochimie des eaux et des gaz (octobre 2000/avril 2001). Les campagnes de reconnaissance de géologie structurale et d'échantillonnage des sources thermales ont eu lieu en octobre 2000. La campagne de profils de mesures des gaz dans les sols a été réalisée en juin-juillet 2001 ;
- une deuxième phase de traitement et d'interprétation des données obtenues, qui indique les principales conclusions de l'étude (février-septembre 2001).

Les travaux de géophysique appliquée, associés au projet Géothermie Réunion ont été faits, en grande partie, par l'Université de La Réunion. Quelques rencontres ont été organisées entre les équipes du BRGM et de l'Université de La Réunion mais l'essentiel des résultats doit être confronté et discuté dans une réunion à venir.

1.3. PRINCIPAUX OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Cette étude a pour principal objectif de caractériser un réservoir géothermique et d'améliorer l'élaboration du modèle de ce réservoir, à partir d'investigations de surface dans un contexte géologique du type des cirques de La Réunion (Salazie, Cilaos). Elle doit permettre d'identifier des zones favorables (source de chaleur et eau) destinées à une campagne de forages de reconnaissance. Comme les résultats obtenus au cours des campagnes d'exploration précédentes ont contribué à mettre en évidence des sources de chaleur dans les cirques de Salazie et de Cilaos mais n'ont pas abouti à la découverte de zones suffisamment perméables pour pouvoir être exploitées en géothermie, l'accent a été mis sur la recherche de conditions de perméabilité adéquates au sein de l'édifice volcanique, condition *sine qua non* pour extraire l'énergie thermique contenue dans le substratum des cirques.

Au vu des données existantes et des difficultés attendues dans l'exploration de réservoirs géothermiques à La Réunion, plusieurs travaux dans les domaines de la géologie structurale, de la géochimie des eaux et des gaz dans les sols ont été identifiés et ont été réalisés par le BRGM dans le cadre de cette étude. L'objet de ce rapport est donc : (1) de présenter les principales observations et mesures récoltées sur le terrain durant la phase de reconnaissance réalisée en 2000, (2) de présenter les résultats de la campagne de profils de mesures de gaz dans les sols de juin 2001, (3) d'intégrer l'ensemble des résultats de prospection géothermique dans le contexte plus général du piton des Neiges avec la prise en compte des structures volcano-tectoniques et des nouvelles données sur la géochimie des fluides et des gaz, et enfin, (4) de proposer, à l'échelle des cirques, un modèle conceptuel qui rende compte des circulations hydrothermales potentielles, éléments de base au développement de la géothermie. Une partie uniquement bibliographique centrée sur l'analyse des structures volcano-tectoniques du piton de la Fournaise est également présentée.

2. Étude géologique

2.1. MÉTHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE

La priorité a été donnée à la recherche d'indices sur les conditions de perméabilité au sein du substratum des cirques. La campagne de terrain réalisée dans les deux cirques de Salazie et de Cilaos a porté essentiellement sur la recherche d'indices de fracturation précoce (joints, dykes) ou de réactivation tectonique (faille) et de dépôts hydrothermaux associés. Cette campagne s'est essentiellement appuyée sur la carte géologique (Billard, 1974), des documents de référence comme les thèses de Rocher (1988) et de Maillot (1999) et la carte des sources thermales. Ces travaux reprennent et synthétisent l'analyse systématique des différents ensembles d'intrusions volcaniques faite par Robert (1980). Les observations et les mesures collectées, fonction des conditions d'affleurement, ont été réalisées dans les ravines, le long des routes ou des chemins type GR. Des mesures à la boussole de structures, corrigées de 25° pour tenir compte des fortes valeurs de déclinaison magnétique, ainsi que des profils sécants sur les fractures ont été réalisés. Au niveau de certaines sources thermales, des travertins ont été échantillonnés ainsi que des dépôts fumerolliens.

Dans cette partie géologique, sont successivement présentés par cirque :

- les données collectées à chaque station de mesures sous la forme de tableaux en annexes et de photographies de terrain ;
- des traitements de ces données sous la forme de rosaces, de stéréogrammes et de profils 1D de fractures accompagnés d'un texte de commentaire ;
- des résultats d'analyses des dépôts hydrothermaux et des travertins sous forme de tableaux de résultats ;
- une analyse bibliographique portant sur les principaux accidents structuraux du massif du piton de la Fournaise ;
- un rappel sur les données volcano-tectoniques existantes dans les cirques étudiées ;
- une interprétation des données géologiques en termes de circulations et de localisation des zones de drains potentiels susceptibles d'avoir un intérêt pour la géothermie et son développement.

2.2. TRAVAUX RÉALISÉS DANS LE CIRQUE DE SALAZIE

La campagne de reconnaissance géologique dans le cirque de Salazie a porté sur 7 sites d'observation qui sont listés ci-dessous (fig. 1) :

- Site Salazie 1 : ravine Olivette-rivière du Mât
- Site Salazie 2 : rivière du Mât
- Site Salazie 3 : ravine Grosse Roche
- Site Salazie 4 : rivière Fleurs Jaunes
- Site Salazie 5 : source Manouilh
- Site Salazie 6 : rivière du Mât-Trou Blanc
- Site Salazie 7 : camp Pierrot-Grand Sable

Ces sites d'observation sont situés à l'intérieur et à l'extérieur des limites supposées de la caldeira la plus récente du massif du piton des Neiges, proposée par Rocher (1988).

2.2.1. Site SALAZIE 1 : ravine Olivette-rivière du Mât

a) Présentation du site

Ce site se trouve au pied sud du piton d'Enchaing. Quelques sources thermales sont connues dans ce secteur.

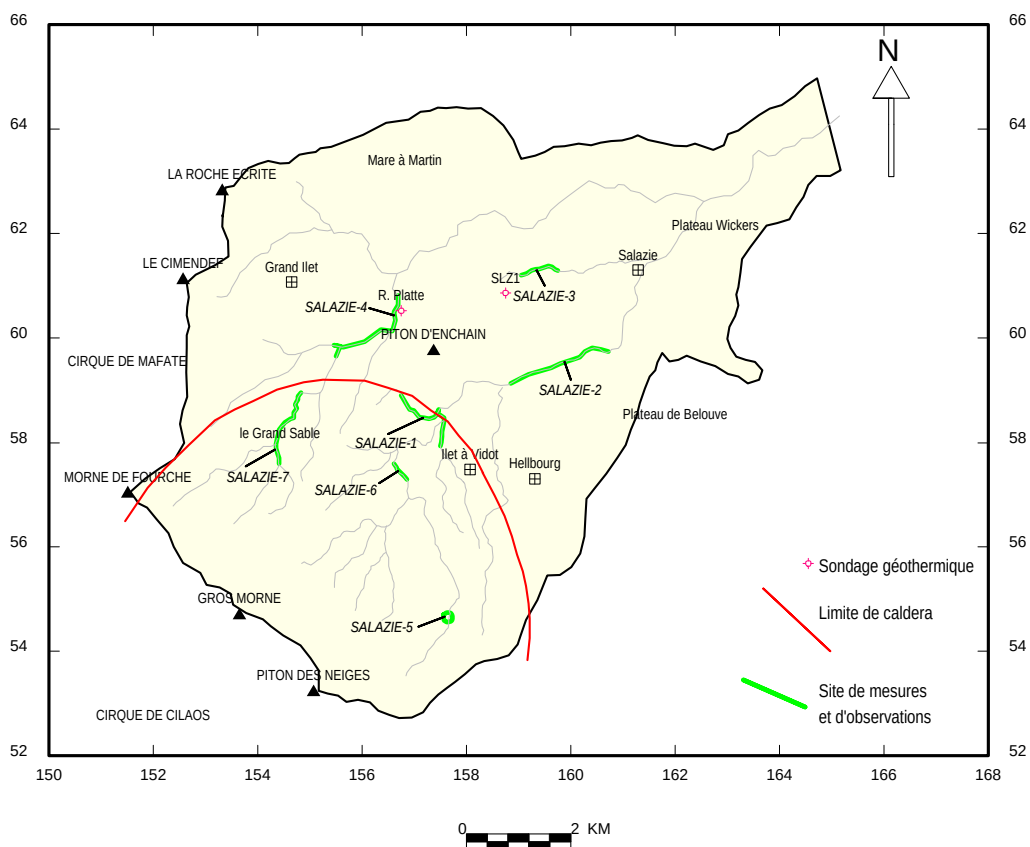


Fig. 1 - Carte des stations d'observations réalisées dans le cirque de Salazie.

b) Présentation des observations et mesures

Station 1 (ravine Olivette)

Aucun affleurement en place n'a été reconnu dans la ravine. Seules des formations alluviales (galets) et de remaniement sont visibles. Un dépôt blanchâtre sur les galets dans le lit de la rivière pourrait traduire la présence d'émergences de fluides minéralisés.

Station 2 (rivière du Mât)

Des observations ont été faites depuis la passerelle jusqu'à la confluence avec la ravine Olivette. Au niveau de la passerelle, la rivière du Mât entaille les formations du complexe intrusif de la rivière du Mât et leur encaissant d'océanites anciennes zéolitisées. Il s'agit de roches grenues sombres au sein desquelles il est fréquent d'observer des litages magmatiques orientés N80° à N100° et plongeant 30 à 40° vers le sud. Ce complexe intrusif est lui-même recoupé par des dykes, de rares sills, des joints et une faille normale :

- une famille de dykes de puissance métrique et d'extension verticale décamétrique est orientée N110° à pendage nord (fig. 2a) ;
- les joints correspondent à des structures de dimension métrique colmatées par des dépôts blanchâtres et s'organisent en deux familles orientées NE-SW et NW-SE (fig. 2b) ; leur espacement moyen étant de l'ordre de 20 cm ;
- une faille normale montrant un rejet de 1,5 m orientée N27°E 48°W et portant une ligne quasi verticale montrant un pitch de 88° vers le nord, affecte un dépôt de brèches induré. La présence de veinules à zéolites dans ces formations de brèches semble indiquer que ces formations sont anciennes ;
- une autre structure ayant la même orientation que la faille normale montre des caractéristiques analogues avec des stries dans la ligne de plus grande pente ; le mouvement est supposé normal.

Dans ce secteur de la rivière du Mât, les coulées de laves anciennes montrent une orientation 110° à 130° avec un pendage de 10° vers le nord.

Proche de la confluence avec la ravine Olivette, une petite source émerge au pied de la falaise en rive droite de la rivière du Mât, au sein des laves anciennes altérées zéolitisées. Elle est marquée par une zone supérieure blanchâtre de 10 m² avec, à la base, des dépôts ferrugineux non indurés de teinte rouille. Bien qu'il y ait la présence de deux plans de fractures orientés NW-SE, il n'y pas de contrôle structural évident pour cette petite source.

Station 3 (pied du piton d'Enchaing)

Après la confluence de la ravine Olivette et dans un coude de la rivière du Mât, la falaise en rive gauche est formée par les coulées anciennes zéolitisées qui semblent avoir été verticalisées. Cette structuration générale verticale pourrait être mise en relation avec la proximité de la bordure supposée de la caldeira la plus récente du massif du piton des Neiges proposée par Rocher (1988).

Dans le même secteur, on a observé et mesuré des plans de discontinuité d'extension pluri-décamétrique, soulignés par une couleur rouille caractéristique, orientés N110°E 75°S. Il pourrait s'agir de bases ou toits de coulées de lave ou d'écoulements pyroclastiques où se concentrent préférentiellement les circulations de fluides.

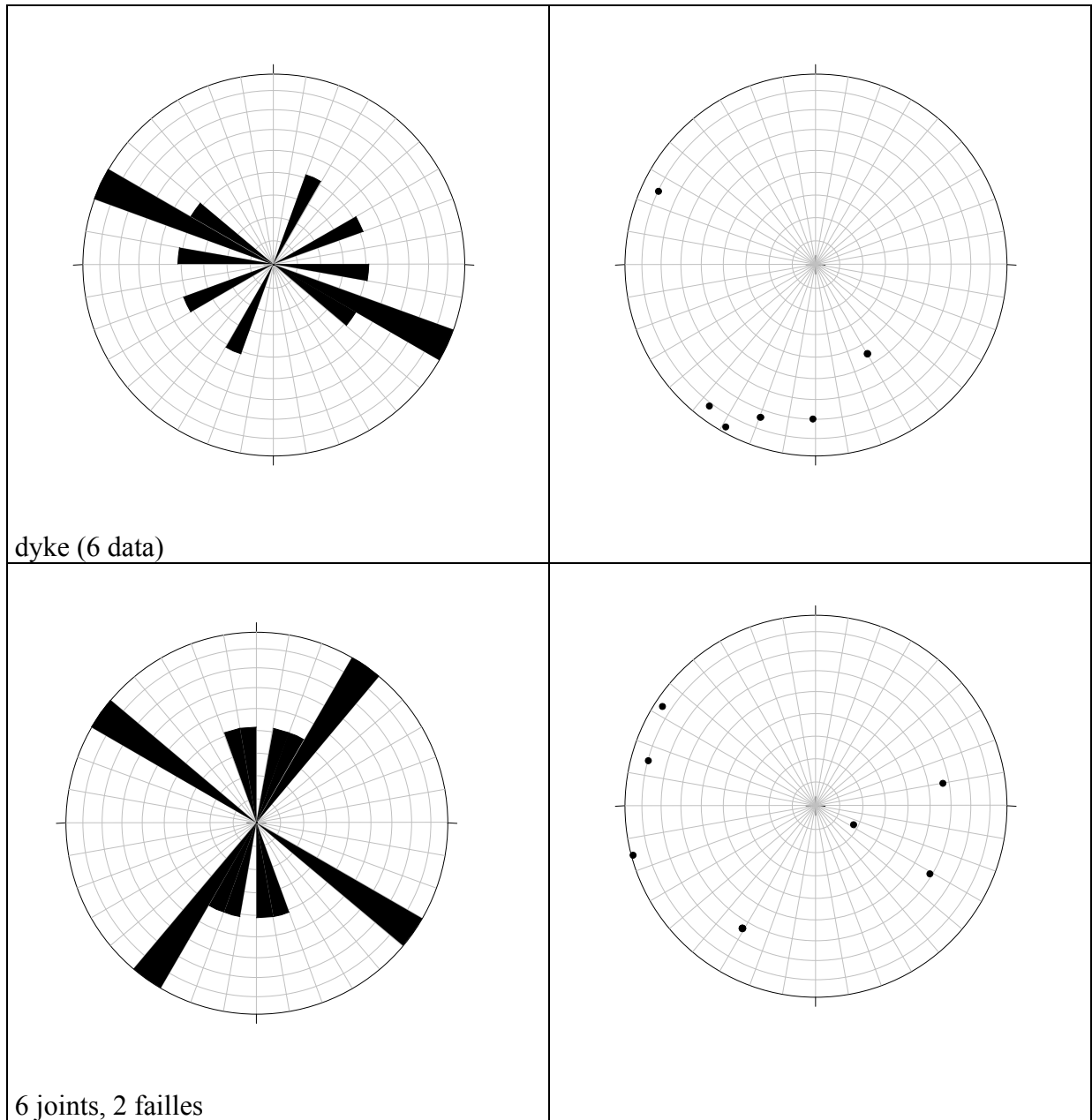


Fig. 2 - Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieure des dykes (A, B) et des joints (C, D) de la Station 2 de la ravine Olivette - rivière du Mât, cirque de Salazie.

c) Synthèse des observations

Le site de Salazie 1 montre qu'il y a peu d'évidence de fracturation dans ce secteur du cirque. Une seule faille normale d'ampleur modérée (rejet vertical 1,5 m) a été reconnue. La seule structuration significative correspond à la verticalisation des coulées

anciennes d'océanites au pied du piton d'Enchaing qui pourrait témoigner de la proximité de la bordure de la caldeira (Rocher, 1988).

Les quelques sources thermales reconnues, qui ont des débits faibles, ne montrent pas de contrôle structural évident au niveau de leur émergence.

2.2.2. Site SALAZIE 2 : rivière du Mât

a) Présentation du site

Ce site se situe dans la rivière, en aval du piton d'Enchaing. Il s'agit d'une vallée largement ouverte, orientée N70°, et offrant de bonnes conditions d'affleurement en rive droite. La longueur de la zone reconnue est de 1,5 km.

b) Présentation des observations et mesures

Station 1 (lit de la rivière ; altitude 525 m)

Dans le lit de la rivière, affleure un dépôt fluviatile récent meuble et stratifié, surmontant un dépôt du même type mais plus ancien, de teinte sombre. Au sein de ce dernier, se développe un plan de fissure subvertical, souligné par des traces d'oxydation ocre et contenant localement des dépôts de couleur beige en placage dans le plan de fissure. Les épontes de ce plan sont constituées par un matériel argileux verdâtre suggérant une origine fumerollienne. L'extension horizontale est décamétrique et l'extension verticale visible métrique. Ce plan est orienté N27°E 85°E.

Station 2 (lit de la rivière ; altitude 530 m)

Toujours dans le lit de la rivière, affleure sur quelques mètres carrés un dépôt bréchique induré, interprété comme un dépôt d'écoulement pyroclastique grossier primaire ou remanié de type nuée ardente. Il contient un paquet de dépôt fumerollisé ocre-jaune. L'orientation moyenne de ces dépôts est N-S.

À proximité, toujours dans ce dépôt bréchique, des fissures sub-verticales sans remplissage ni trace d'altération sont visibles. Leur orientation est identique au plan précédent, à savoir N0°E 85°E.

Ces dépôts pyroclastiques suggèrent que la rivière du Mât a été un chenal d'écoulement pour des dépôts d'éruptions explosives rattachées à l'activité récente du massif du piton des Neiges.

Station 3 (rive droite ; altitude 540 m)

En rive droite de la vallée, la falaise est formée par une succession de dépôts bréchiques grossiers alternant avec des horizons de teinte claire, parfois oxydés. Ces dépôts sont

non indurés et fortement verticalisés, avec un pendage général vers le sud-est. Dans le détail, la mesure de deux plans de base d'écoulement indique une orientation N25°E 60E.

Ils sont rattachés à l'une des dernières phases d'activité volcanique explosive du volcan du piton des Neiges (Rocher, 1988) sans exclure d'avoir un point d'émission intracirque à proximité du piton d'Enchaing. Il est à noter que la falaise formant la bordure sud-est du piton d'Enchaing est elle-même constituée d'un empilement de dépôts similaires au sein duquel on peut reconnaître des horizons de coulées de lave peu épaisses et des horizons bréchiques (bréchification primaire ou secondaire affectant ces coulées minces). Au droit de cette station, dans le lit de la rivière, des plans de fissures présentant des indices d'altération fumerollienne varicolore affectent des formations bréchiques. Ces fissures orientées N155°E ont un pendage fort (fig. 3).

Station 4 (entrée du défilé)

Le défilé entaille une succession des dépôts bréchiques décrits précédemment. À l'entrée de ce défilé, une structure de type faille ayant une épaisseur de 5 à 20 cm et une extension verticale décamétrique est visible. Elle est orientée N160°E 85E.

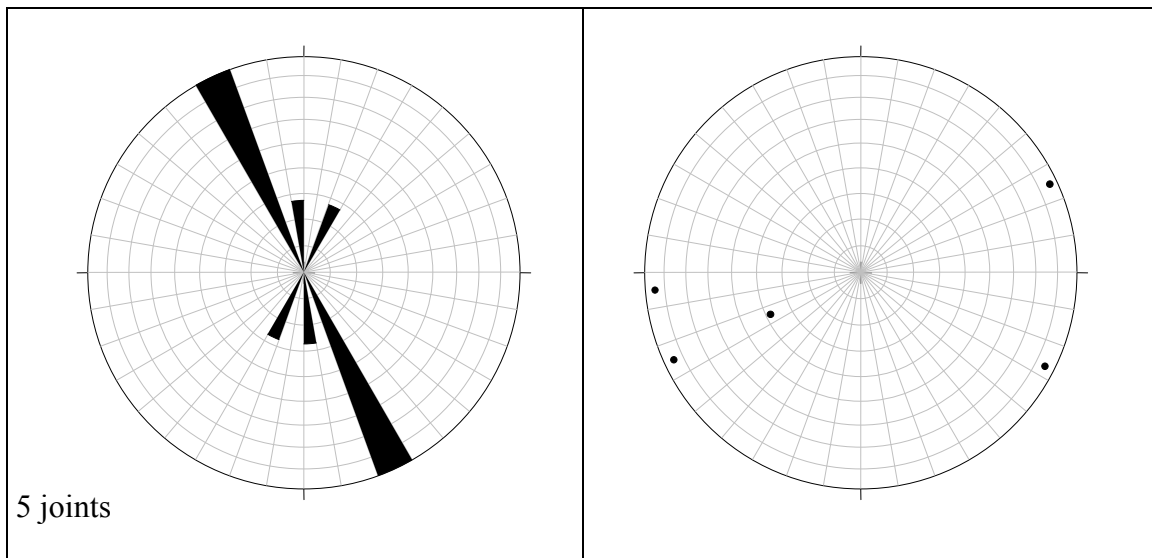


Fig. 3 - Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieure des joints (A, B) de la rivière du Mât, cirque de Salazie.

c) Synthèse des observations

Très peu de structures d'origine tectonique ont été reconnues dans cette portion de la rivière du Mât, excepté quelques plans de fissures ayant une orientation à peu près constante, autour de NNW à N-S. Il semble bien que certains de ces plans aient été le

siège d'une activité fumerollienne. La seule faille observée à l'entrée du défilé possède la même orientation.

2.2.3. Site SALAZIE 3 : ravine Grosse Roche

a) Présentation du site

Ce site se trouve dans la partie nord du cirque de Salazie, dans la ravine Grosse Roche, à l'est de Mare à Vieille Place. Il est proche du site du forage profond SLZ1, effectué en 1986.

b) Présentation des observations et mesures

Station 1 (au fond de la ravine ; altitude 630 m)

Les conditions d'observation sont très médiocres. Les rares affleurements que l'on y trouve montrent des empilements de coulées de lave massives, anciennes et zéolitisées, affectées par une cataclase. Aucune observation pertinente ni mesure structurale n'a pu y être faite.

Station 2 (rive gauche, au niveau cascade)

Un accès en rive gauche de la vallée à partir de Mare à Vieille Place permet d'observer au niveau d'une cascade, des formations bréchiques plus ou moins remaniées, qui recouvrent les coulées de lave observées précédemment au fond de la ravine. Ces formations pourraient provenir du remaniement des dépôts bréchiques observées au niveau du piton d'Enchaing et formant les flancs de la vallée de la rivière du Mât.

2.2.4. Site SALAZIE 4 : rivière Fleurs Jaunes

a) Présentation du site

Ce site se trouve dans la rivière des Fleurs Jaunes. Les observations ont démarré au niveau du radier de la D52 et se sont poursuivies vers le sud-ouest, jusqu'à la ravine camp Pierrot.

b) Présentation des observations et mesures

Station 1 (Radier)

Un profil de mesures orienté N50° a été réalisé sur la dalle de lave massive sombre située en aval du pont. Il s'agit d'une coulée de lave aphyrique fraîche, cartographiée comme une coulée récente par Rocher (1988), et recouvrant les océanites anciennes intrudées par des dykes et sills. Elle est, elle-même, recouverte par un empilement de coulées d'une puissance totale de 15 m, constitué d'une lave aphyrique gris sombre non altérée.

L'interface océanites anciennes - coulée récente est orienté N170°E 10°E.

Les dykes et sills intrusifs dans les océanites anciennes ont une épaisseur de 10 à 50 cm. Ils montrent des orientations N160E (fig. 4). Les contacts entre les coulées de lave récentes et les océanites montrent également la même géométrie.

Quelques joints à zéolites parcourent les océanites anciennes. Ils sont orientés N160° à N180° avec un pendage variable.

Un réseau de joints sub-verticaux non minéralisés affecte la dalle de lave massive prismée. Ces joints plurimétriques dont la trace au sol est rectiligne à irrégulière sont orientés N140° et N160°. Une famille secondaire N10° recoupe le premier réseau (fig. 4).

La répartition des joints N160° semble relativement régulière (fig. 5). La densité de fracturation est de l'ordre de 0,9 fract./m.

Station 2 (premier coude en amont du pont)

Cette station permet d'observer, à nouveau, le contact entre la coulée de lave récente formant une dalle de 1,5 m d'épaisseur et formant un plan orienté N160° 17E et la série des océanites anciennes discordante, avec une orientation générale N0° 27E.

Dans ce secteur de la rivière des Fleurs Jaunes, Rocher (1988) positionne une faille cartographique N20° avec un rejet de 200 mètres. Aucune structure tectonique n'est cependant visible dans cette dalle de lave et dans les océanites.

Cette station permet aussi d'observer le flanc ouest du piton d'Enchaing montrant une succession d'horizons de dépôts bréchiques (analogues à ceux observés depuis la rivière du Mât) avec un fort pendage apparent vers le sud-ouest.

À l'ouest de la vallée des Fleurs Jaunes, ces dépôts bréchiques sont absents. Ceci serait cohérent avec l'hypothèse d'une faille cartographique comme le propose Rocher (1988). On peut aussi avancer l'hypothèse que la paléo-rivière des Fleurs Jaunes représenterait en quelque sorte une limite d'extension pour ces dépôts bréchiques et les coulées minces formant le piton d'Enchaing.

Station 3 (remontée de la rivière jusqu'au croisement avec la ravine camp Pierrot)

Lors de la remontée de la vallée, en plusieurs endroits, quelques joints secs ou minéralisés, orientés N125° et N160° et à pendage variable, affectent la série des océanites anciennes.

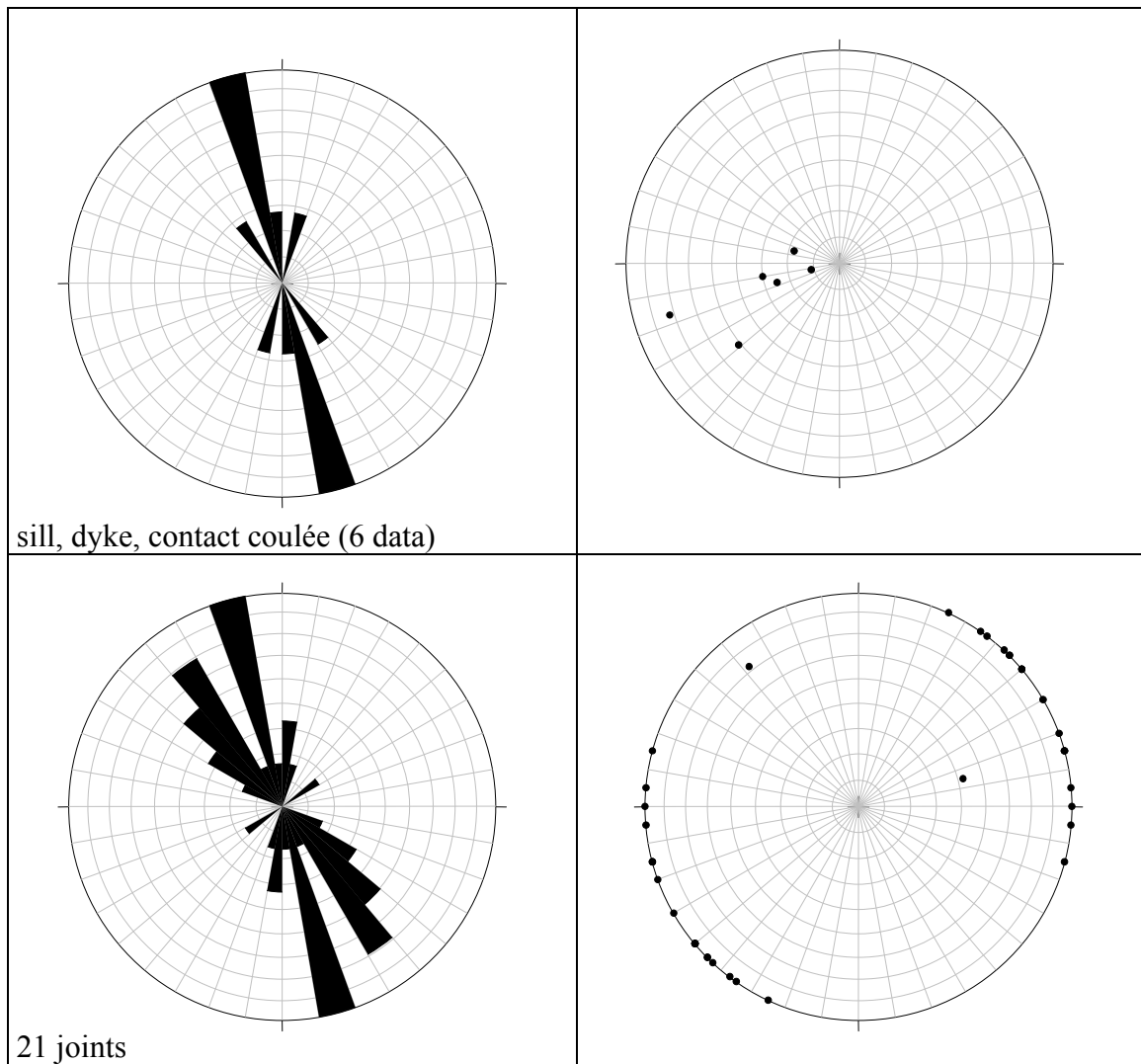


Fig. 4 - Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des dykes (A, B) et des joints (C, D) de la station 1 de la rivière des Fleurs Jaunes, cirque de Salazie.

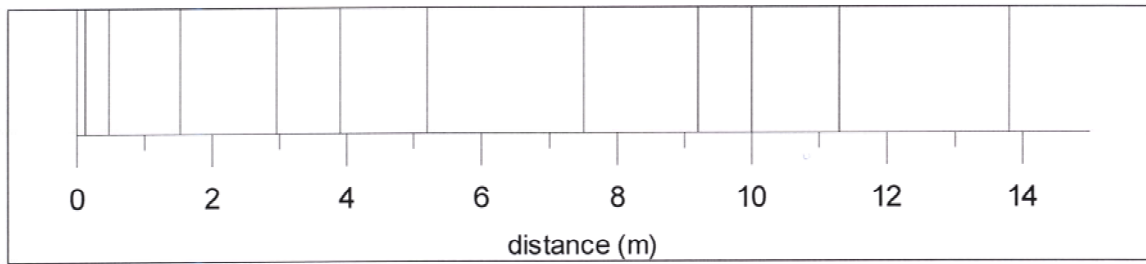


Fig. 5 - Profil de fractures relevées sur la dalle de lave massive au niveau du Radier de la D52. Affleurements de la station 1 de la rivière des Fleurs Jaunes, cirque de Salazie.

Station 4 (entrée ravine camp Pierrot)

Une zone fumerollisée verticale de puissance métrique est observée en rive droite de la ravine camp Pierrot, peu après sa confluence avec la rivière des Fleurs Jaunes. Son orientation moyenne est N15°. Le matériel au sein de cette zone a une teinte rouille, est friable, et dégage une odeur de soufre. Aucune émergence n'est visible au droit de cette zone fumerollisée.

À proximité immédiate, se trouve un dyke orienté N0° 40E. L'ensemble est affecté par des joints mal définis orientés N20°, N100° et N140°. En rive gauche, on observe un dyke vertical N170° 85°W qui se développe sur toute la hauteur de la falaise. Il est jalonné par des traces d'oxydation ocre à rouille.

Dans ce secteur, les dykes sont orientés N20° et les joints sont orientés N120° avec une dispersion relativement forte (fig. 6).

À l'entrée de la ravine camp Pierrot, il y a d'autres indices de zones fumerollisées et des blocs fumerollisés non en place.

À titre d'hypothèse, ces indices d'activité fumerollienne fossiles pourraient être liés à une activité volcanique plutôt qu'à une activité hydrothermale ; les dykes préexistants ayant servi de guide structural contrôlant les circulations de fluides fumerolliens.

c) Synthèse des observations

Des réseaux de joints de dimension métrique à pluri-métrique, rarement minéralisés ont été observés. Il n'y a donc pas de structures tectoniques évidentes majeures dans ce secteur.

Les indices fumerolliens de la ravine camp Pierrot seraient plutôt à rattacher à une phase de l'activité volcanique du massif du piton des Neiges ou d'un appareil volcanique intra-cirque et ne constitueraient donc pas un jalon direct de l'activité hydrothermale récente ou sub-actuelle du massif.

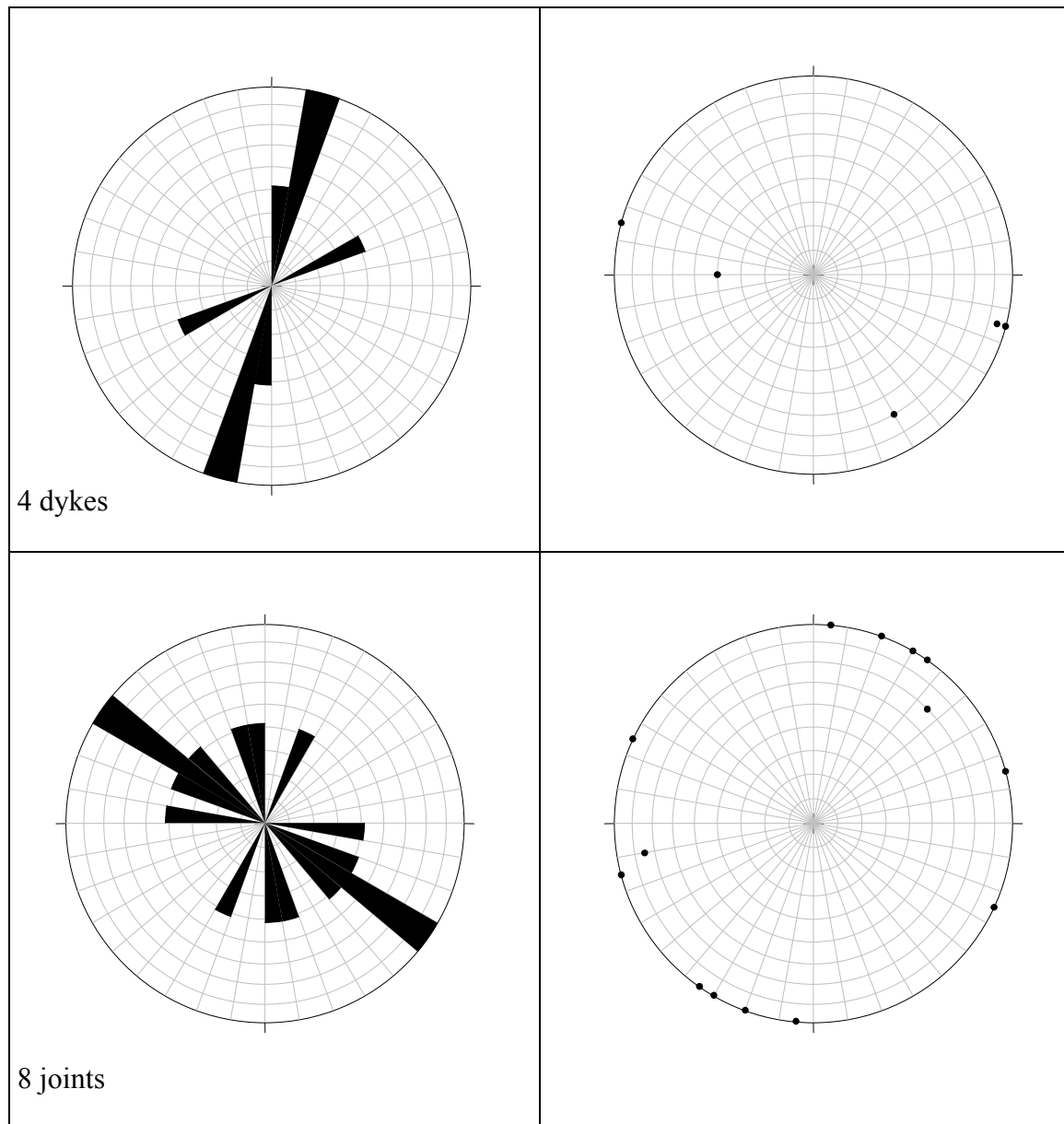


Fig. 6 - Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des dykes (A, B) et des joints (C, D) des stations 3 et 4 de la rivière des Fleurs Jaunes, cirque de Salazie.

2.2.5. Site SALAZIE 5 : source Manouilh

a) Présentation du site

Ce site se situe dans la partie amont de la rivière du Mât (alt. 1 300 m), sur le flanc nord-est du piton des Neiges, à la confluence de plusieurs ravines. Il s'agit en fait d'une série de sources qui émergent en rive gauche de la vallée, quelques mètres au-dessus du lit de la rivière dont l'orientation est environ N10°. La zone d'émergence se répartit sur environ 100 mètres. D'autres sources sont identifiables dans les ravines adjacentes grâce à leurs encroûtements blanchâtres.

b) Présentation des observations et mesures

Ces sources émergent au sein de la série des océanites anciennes intrudées par de nombreux dykes et sills. L'ensemble du matériel est largement hydrothermalisé.

Ces émergences se caractérisent par la présence de dépôts ferrugineux de teinte rouille et des travertins blanchâtres de nature carbonatée. Leur débit est faible, à l'exception de celle qui émerge à mi-hauteur de la falaise et qui se déverse dans la rivière par une cascade.

Les dykes et les sills intrusifs dans les océanites anciennes sont orientés N130° (fig. 7).

Quelques joints d'épaisseur millimétrique à remplissages blanchâtres et une petite faille supposée affectent la formation et sont orientés N140° avec une forte dispersion directionnelle (fig. 7).

Ces sources étant relativement dispersées, aucun contrôle structural n'est mis en évidence.

c) Synthèse des observations

La source Manouilh se caractérise par de nombreuses émergences à faible débit auxquelles sont associés des encroûtements et des dépôts importants (hydroxydes de fer, carbonates). Le contexte géologique de ces sources se caractérise par l'abondance de dykes et sills intrusifs dans les océanites anciennes. Il n'y a cependant pas de contrôle structural dans la mesure où les différents points d'émergence ne se situent pas au droit de structures.

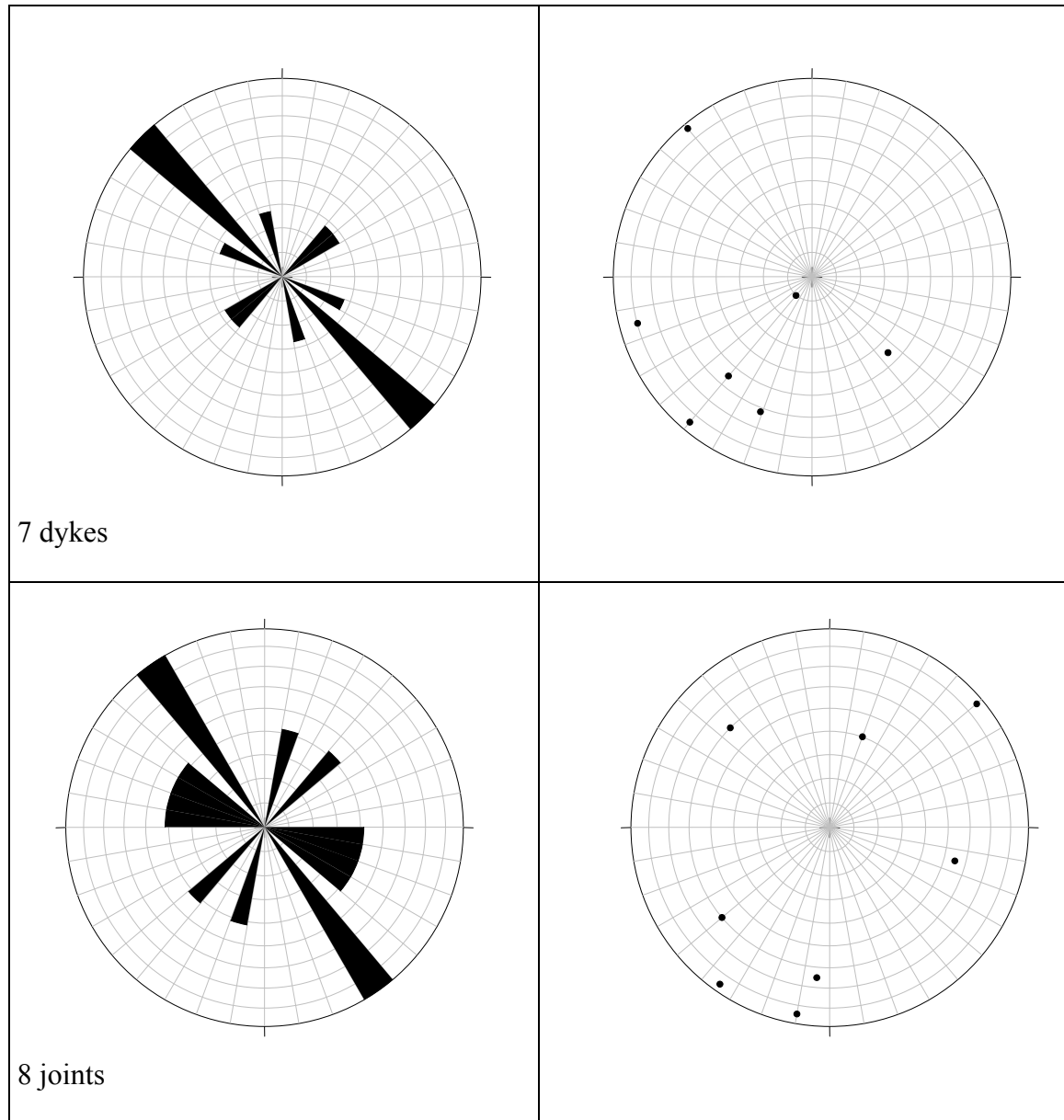


Fig. 7 - Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des dykes (A, B) et des joints (C, D) de la source Manouilh, cirque de Salazie.

2.2.6. Site SALAZIE 6 : rivière du Mât - Trou Blanc

a) Présentation du site

Ce site accessible par le GR R1 se situe dans le lit de la rivière du Mât, environ à mi-chemin entre le piton d'Enchaing au sud et le massif du piton des Neiges au nord. Plusieurs petites sources à débit très faible émergent dans le lit de la rivière.

b) Présentation des observations et mesures

Les formations affleurantes dans le lit de la rivière sont des brèches anciennes zéolitisées intrudées par des sills et dykes centimétriques à métriques appartenant au complexe intrusif de la rivière du Mât. Dans la partie nord de la zone reconnue, un affleurement de lave massive micro-syénitique forme la cascade de Trou Blanc.

En amont du GR, de nombreux dykes et sills sont observés. Leur puissance est inférieure au mètre et leur orientation variable. Ils sont orientés N100 à N110 et N160° (fig. 8).

Au niveau d'une petite émergence avec des dépôts d'hydroxydes de fer, des joints plurimétriques sans remplissage associés à une zone bréchifiée (faille supposée) se développent dans les océanites anciennes. Ces joints et la zone bréchifiée sont orientés N80 et N100° (fig. 8).

Plus en amont, un autre point d'émergence fossile est observé sous une série de sills qui semblent jouer ici un rôle de barrière.

Toujours en amont, sous un sill métrique, une bande plus intensément bréchifiée affecte les brèches anciennes zéolitisées. Son origine n'a pas été élucidée.

Au niveau du GR, en rive droite, plusieurs suintements avec dépôts d'hydroxydes de fer émergent sous l'empilement de sills.

En aval du GR, entre ce dernier et le défilé de Trou Blanc (microsyénite massive), des joints, dykes et sills sont visibles dans les brèches anciennes zéolitisées. De nombreux suintements sont également observés dans ce secteur, sans relation apparente avec les structures précédentes.

c) Synthèse des observations

Il y a dans ce secteur de nombreuses intrusions (dykes, sills, microsyénite) rattachées au complexe intrusif de la rivière du Mât, mais les joints et les failles restent très rares. Cependant, la forte densité de sources présentes pourrait être liée à la présence du corps intrusif.

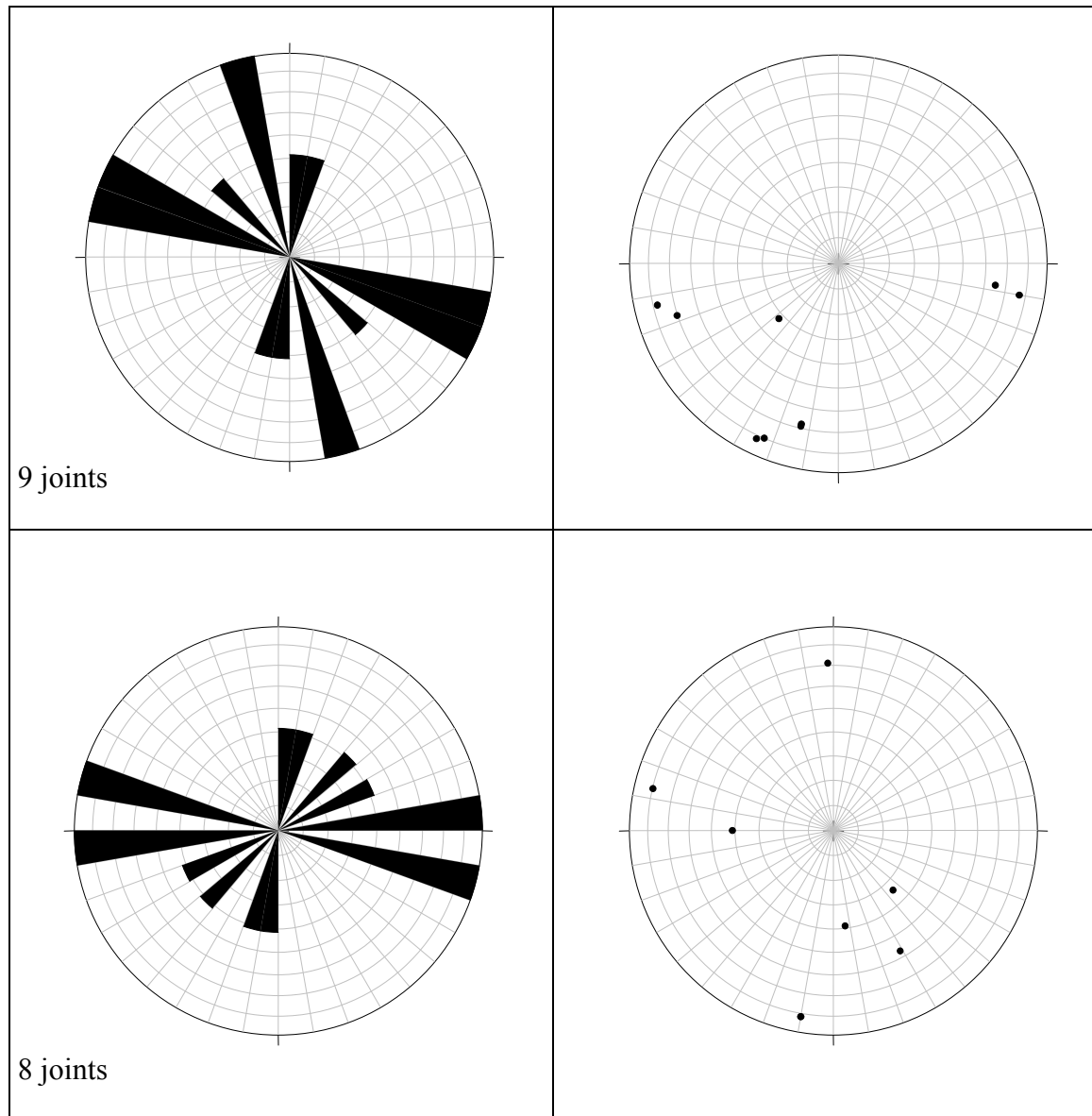


Fig. 8 - Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des dykes (A, B) et des joints (C, D) de la rivière du Mât, Trou Blanc, cirque de Salazie.

Par ailleurs, on constate que localement les sills peuvent jouer un rôle d'écran imperméable.

2.2.7. Site SALAZIE 7 : camp Pierrot - Grand Sable

a) Présentation du site

Ce site comprend une partie du cours supérieur de la rivière des Fleurs Jaunes et le plateau de Grand Sable.

b) Présentation des observations et mesures

Le cours supérieur de la rivière des Fleurs Jaunes permet d'observer en falaise les formations d'océanites anciennes largement hydrothermalisées (zéolitisées). Il s'agit essentiellement d'un empilement de coulées de lave et de brèches anciennes, recoupé par de rares dykes et sills de lave non altérée. Deux mesures ont donné les orientations suivantes : N89°E 28°S (sill) et N14°E 85°W (dyke).

Le plateau de Grand Sable correspond à une zone d'épandage de matériaux détritiques hétérométriques provenant de l'éboulement historique (1875) de grande ampleur, localisé dans le haut de la ravine du Grand Sable. Une source émerge au niveau de la cicatrice d'arrachement de ce glissement mais n'a pas fait l'objet d'une reconnaissance géologique. On peut faire remarquer qu'elle est située dans un contexte similaire à celui de la source Manouilh, c'est-à-dire au pied du piton des Neiges.

En amont de la confluence avec la ravine camp Pierrot, la rive droite de la rivière des Fleurs Jaunes est affectée par un éboulement de grande ampleur qui met à nu les formations d'océanites anciennes.

c) Synthèse des observations

Il apparaît que la densité des intrusions dans les océanites anciennes dans ce secteur du cirque de Salazie est très faible, comparée aux autres secteurs reconnus.

2.3. TRAVAUX RÉALISÉS DANS LE CIRQUE DE CILAOS

La campagne de reconnaissance géologique dans le cirque de Cilaos a porté sur 4 sites d'observation qui sont listés ci-dessous (fig. 9) :

- Site Cilaos 1 : route d'Ilet à Cordes
- Site Cilaos 2 : GR2-Cilaos-rivière du Bras Rouge
- Site Cilaos 3 : Bras Rouge-la Chapelle
- Site Cilaos 4 : route N5 Cilaos-Saint Louis

La plupart des observations ont été faites dans la partie occidentale du cirque, c'est-à-dire dans la vallée de la rivière du Bras Rouge, et notamment, à proximité des corps intrusifs de microsyénite (Pain-de-Sucre, la Chapelle).

2.3.1. Site CILAOS 1 : route d'Ilet à Cordes

a) Présentation du site

Ce site se situe dans la partie septentrionale du cirque de Cilaos et offre donc la possibilité d'accéder aux formations proches du cœur du flanc sud du massif du piton des Neiges. Il offre notamment l'opportunité d'observer à la fois le complexe intrusif affleurant très bien le long de la RD242 et l'intrusion de microsyénite du piton de Sucre qui constitue la principale intrusion connue dans ce cirque. Le profil le long de cette route est composé de onze stations de mesures et observations dont les caractéristiques sont présentées ci-dessous et reportées sur la figure 9.

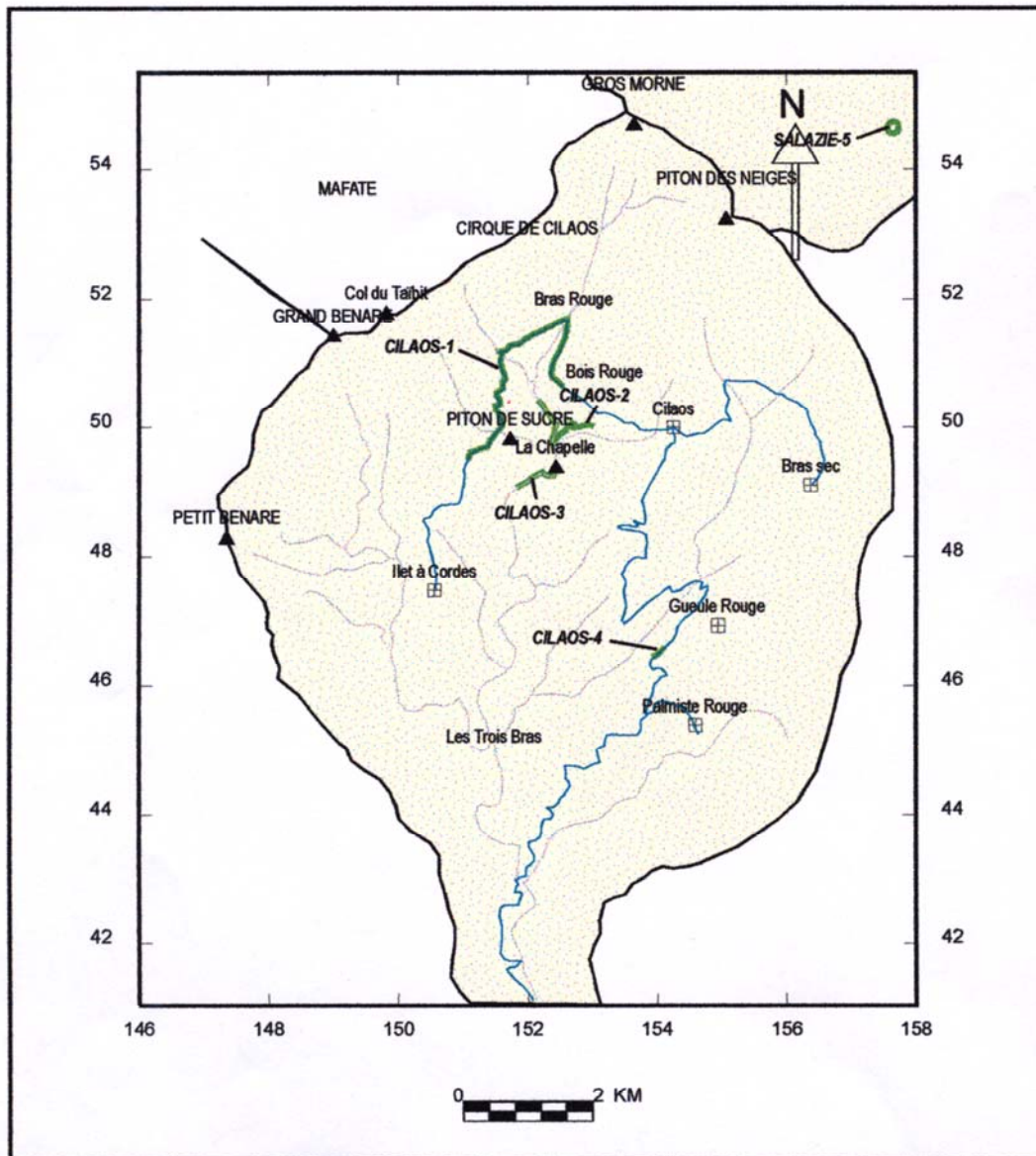


Fig. 9 - Carte des stations d'observations réalisées dans le cirque de Cilaos.

b) Présentation des observations et mesures

Station 1

Des mesures d'espacement ont été réalisées sur des dykes, sills et des joints le long d'un profil orienté N305 °E et long de 63 m, au niveau de l'Ilet du Bois Rouge. L'encaissant est constitué par des formations d'océanites anciennes intrudées par des dykes et sills généralement hydrothermalisés mais non zéolitisés.

Les 4 profils réalisés dans les océanites visent à échantillonner essentiellement le cortège d'intrusions (dykes, sills) et quelques joints. Les densités brutes de fracturation sont relativement faibles avec des valeurs variant de 0,13 à 0,29 fract./m. L'organisation des systèmes d'intrusions filoniennes montre des zones où les dykes sont plutôt concentrés en amas (fig. 10A), avec des zones décimétriques vierges de structures (fig. 10B). Les profils S5 P1 et S7 P1 montrent une organisation plus régulière (fig. 10C, D).

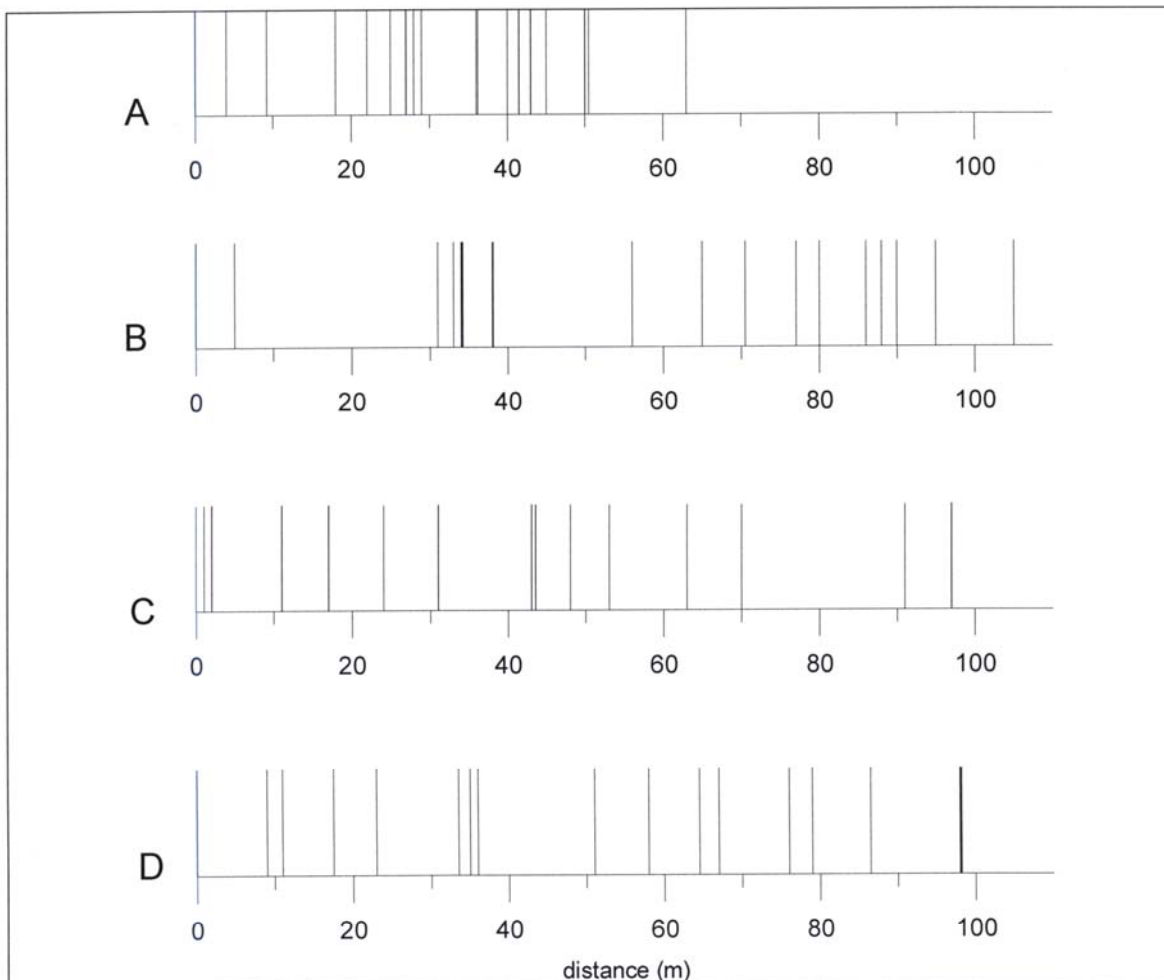


Fig. 10 - Profils de fractures relevées dans le cirque de Cilaos. Affleurements jalonnant la route d'Ilet à Cordes. A : station 1, B : station 4, C : station 5, D : station 7.

L'épaisseur des dykes varie de 0,1 à 1 m. Les rosaces directionnelles et les projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des structures relevées sont présentées ci-dessous (fig. 11). Les dykes s'organisent en deux familles dominantes orientées N30 et N170E (fig. 11A, B). Les sills représentent une famille secondaire N90E à plongement nord. Les joints se regroupent autour des directions N10E, N60E et N110E (fig. 11B, D). Les deux dernières familles d'intrusions plongent vers le nord.

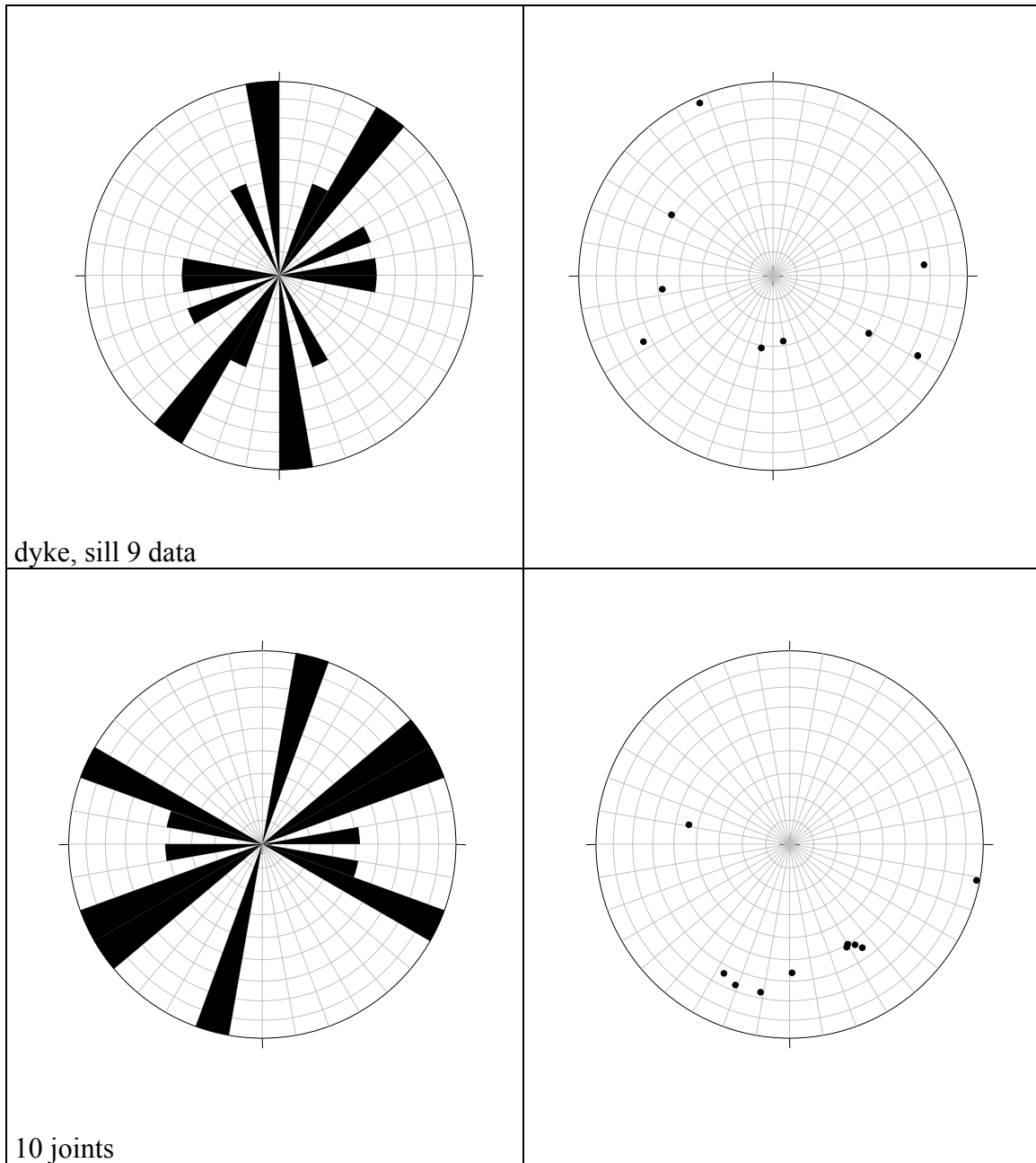


Fig. 11 - Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des dykes (A, B) et des joints (C, D) de la Station 1 de la route d'Ilet à Cordes, cirque de Cilaos.

Stations 2, 3, 4 et 5

Des mesures d'espacement ont été réalisées sur des dykes, sills et des joints le long de plusieurs profils situés de part et d'autre du pont de la rivière du Bras Rouge jusqu'au croisement avec le sentier de Grande Randonnée (GR), répartis sur une distance de 700 m. L'encaissant est toujours constitué par des formations d'océanites anciennes intrudées par des dykes et sills généralement hydrothermalisés mais non zéolitisés.

Sur ces affleurements, les intrusions se regroupent parfois en zones qui sont complètement injectées de dykes ou sills. Ces intrusions montrent une certaine dispersion directionnelle entre N0 et N40E avec un maximum centré sur N0E, l'ensemble des structures plongeant vers l'ouest (fig. 12). L'épaisseur des dykes ou des sills varie de 0,1 à 1,2 m. En ce qui concerne les joints, il y a autant de pics directionnels que de structures ; ceci montre que le nombre de données n'est pas assez significatif pour pouvoir en tirer des enseignements d'ordre structural (fig. 12).

Stations 6 et 7

Des mesures d'espacement ont été réalisées sur des dykes, sills et des joints le long de ces stations situées de part et d'autre du croisement de la RD242 avec le GR du col du Taïbit. L'encaissant est toujours constitué par des formations d'océanites anciennes intrudées par des dykes et sills généralement hydrothermalisés mais non zéolitisés.

Les dykes dont l'épaisseur varie de 0,1 à 1 m, s'organisent deux familles principales orientées N10 et N160E et une famille secondaire N40E (fig. 13). Comme pour la station précédente, les intrusions montrent un plongement général vers l'ouest. Le nombre de joints observés reste limité. Ceux-ci correspondent à des plans de débit intra-dyke ou de joint de refroidissement. Leur direction N110E est globalement perpendiculaire à celle des intrusions (fig. 13).

Stations 8, 9 et 10

Des mesures et observations ponctuelles ont été réalisées en plusieurs endroits le long de la RD242. L'encaissant est toujours constitué par des formations d'océanites anciennes intrudées par des dykes et sills généralement hydrothermalisés mais non zéolitisés.

Au niveau de la station 8, un réseau de sills peu pentés orienté NNW-SSE est recoupé par un réseau de dykes d'épaisseur métrique sub-verticaux NNE-SSW.

Au niveau de la station 9, un complexe de sills horizontaux à faiblement pentés intrusifs, dans les océanites zéolitisées, occupe en volume plus de 50 % de l'affleurement. Ces sills sont recoupés par un système plus tardif de sills et dykes de nature trachytique ayant une fracturation interne bien développée. L'altération de l'affleurement est importante avec une teinte générale beige à ocre.

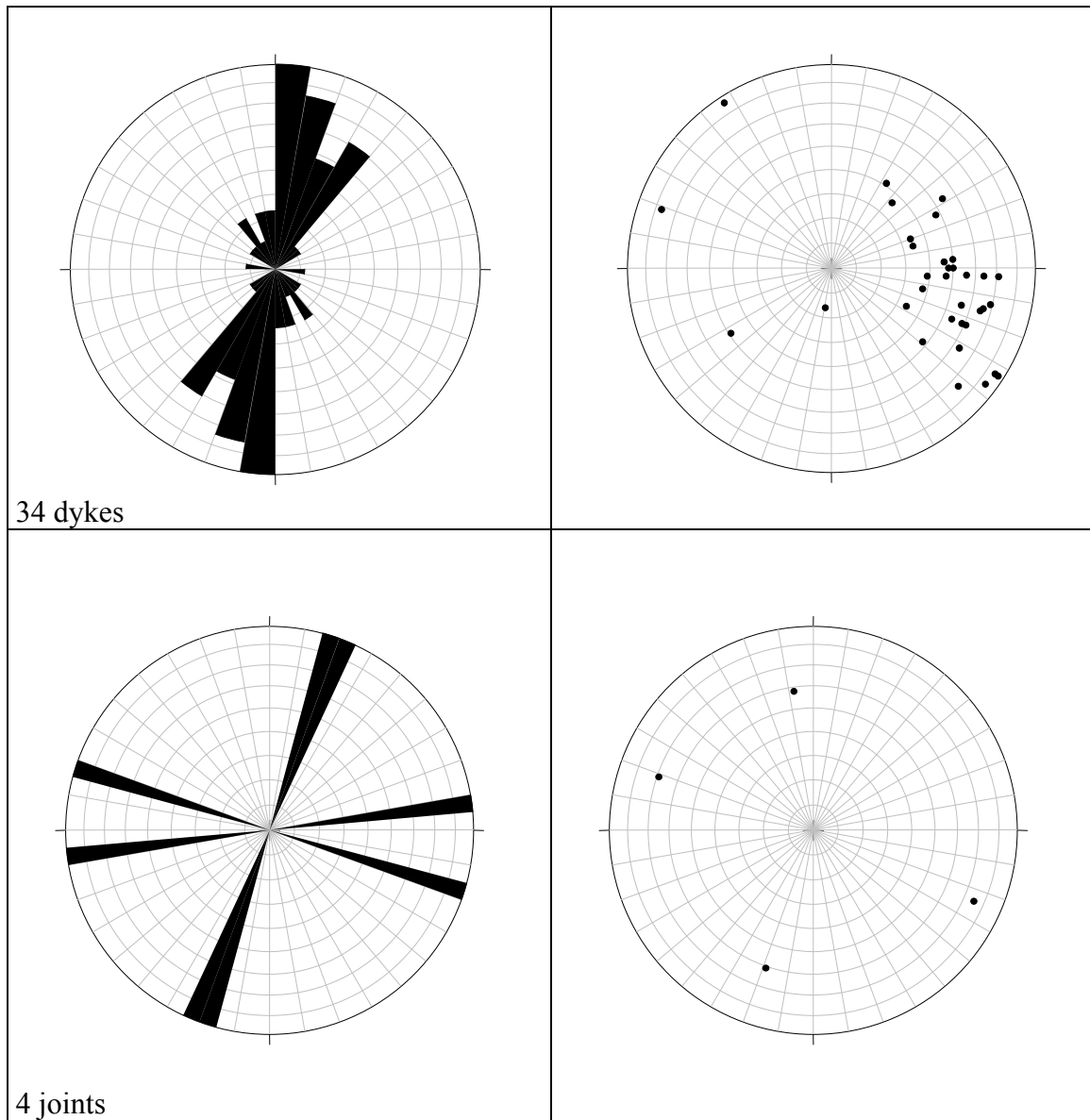


Fig. 12 - Rosaces et projections stéréographiques dans hémisphère de Schmidt inférieure des dykes (A, B) et des joints (C, D) des stations 2 à 5 de la route d'Ilet à Cordes, cirque de Cilaos.

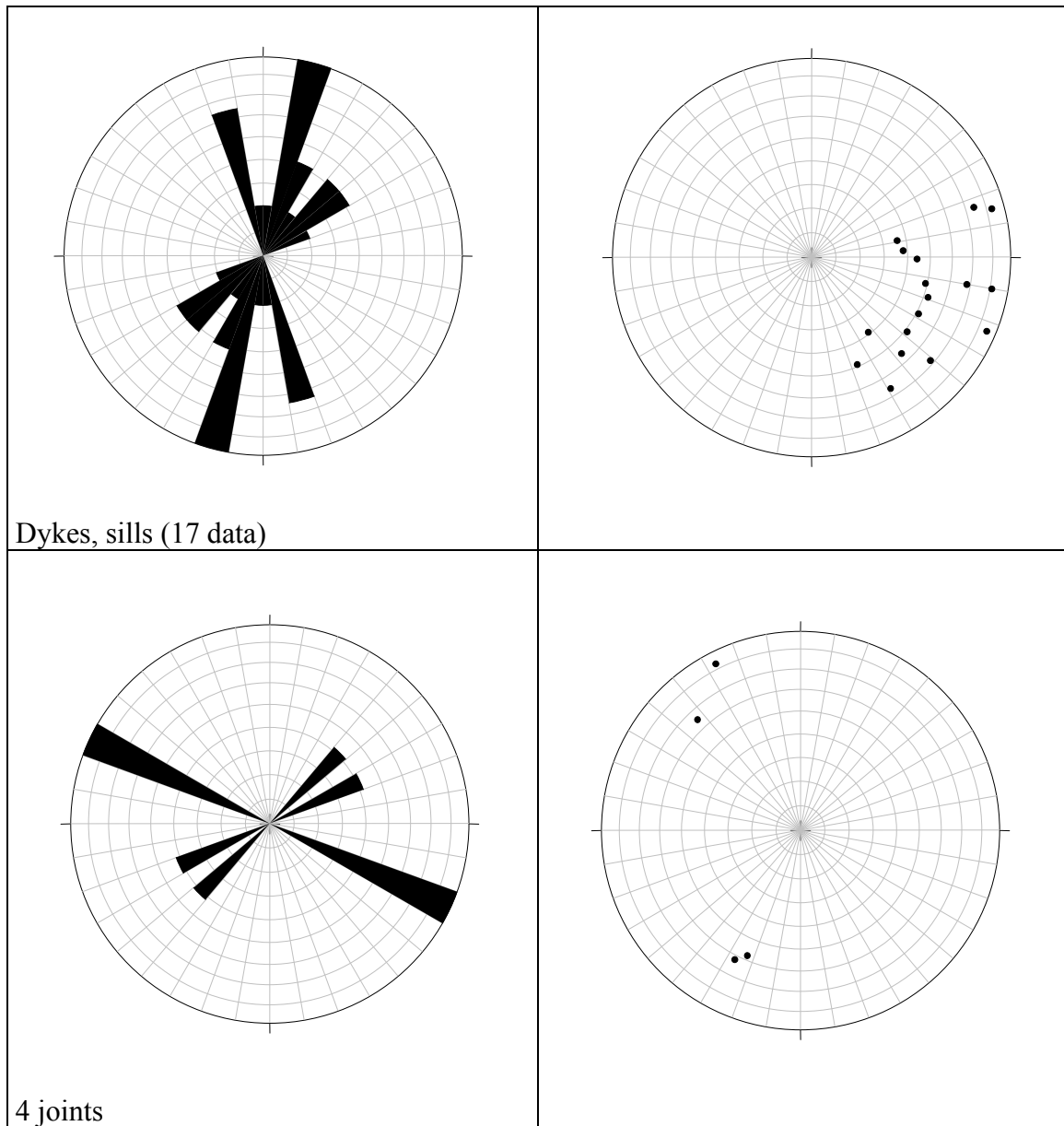


Fig. 13 - Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieur des dykes (A, B), et des joints (C, D) des stations 6 à 7 de la route d'Ilet à Cordes, cirque de Cilaos.

Au niveau de la station 10, le complexe de sills anciens sub-horizontaux est entaillé par un paléo-chenal de 20 à 30 m de large, rempli d'une formation bréchique constituée de blocs d'océanites anciennes.

Station 11 (piton de Sucre)

Cette station se situe au niveau de l'intrusion de microsyénite du Pain de Sucre. Cette intrusion forme une barre orientée approximativement WNW-ESE et plongeant vers le

nord. Dans le détail, en amont du pont, les bordures de l'intrusion sont orientées N145°E80°E au nord-ouest et N105°E 80°N au sud-ouest. En aval du pont, la bordure sud-est s'évase avec une orientation N165°E 80°W.

Trois profils de mesures d'espacement de joints non remplis, sub-verticaux, développés dans la microsyénite ont été réalisés selon des directions N075°E, N110°E et N130°E (fig. 14). Les densités brutes de fracturation varient entre 0,7 et 3,4 fract./m. Le profil le plus long dans la barre de syénite montre une répartition assez homogène des joints recoupés (fig. 14A) avec localement quelques zones légèrement plus densifiées en structures (couloirs). Les profils les plus courts montrent une organisation hétérogène ; avec des zones où les espacements sont assez serrés qui alternent avec des zones où les espacements sont relativement lâches (fig. 14 B, C).

Ces joints se décomposent en joints isolés et en joints maîtres. Les joints montrent une orientation préférentielle N50E $\pm$ 10E très marquée (fig. 15). Le pendage des structures est clairement vers le sud. Dans ce secteur, aucun dyke plus récent n'a été observé dans l'intrusion.

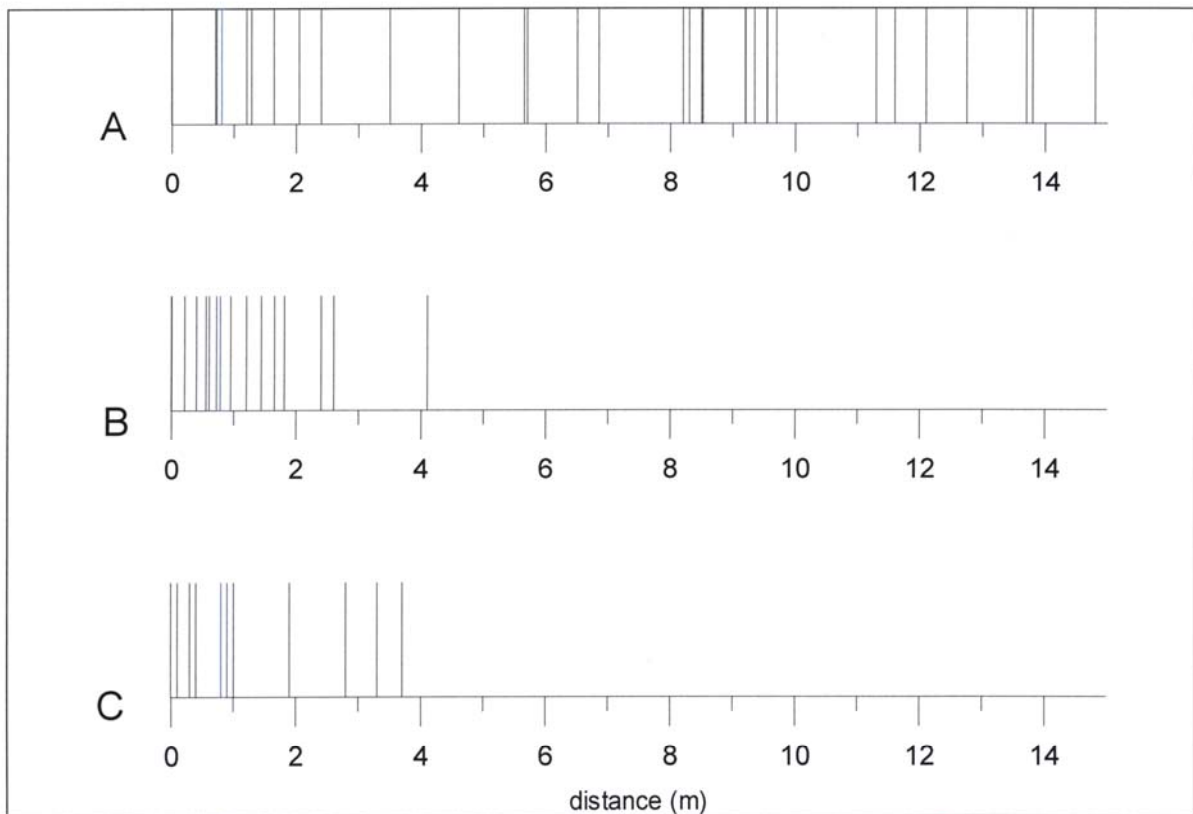


Fig. 14 - Profils de fractures relevées dans le cirque de Cilaos. Le Pain de Sucre, route d'Ilet à Cordes, station 11. A : partie sud, B : partie centrale, C : partie W.

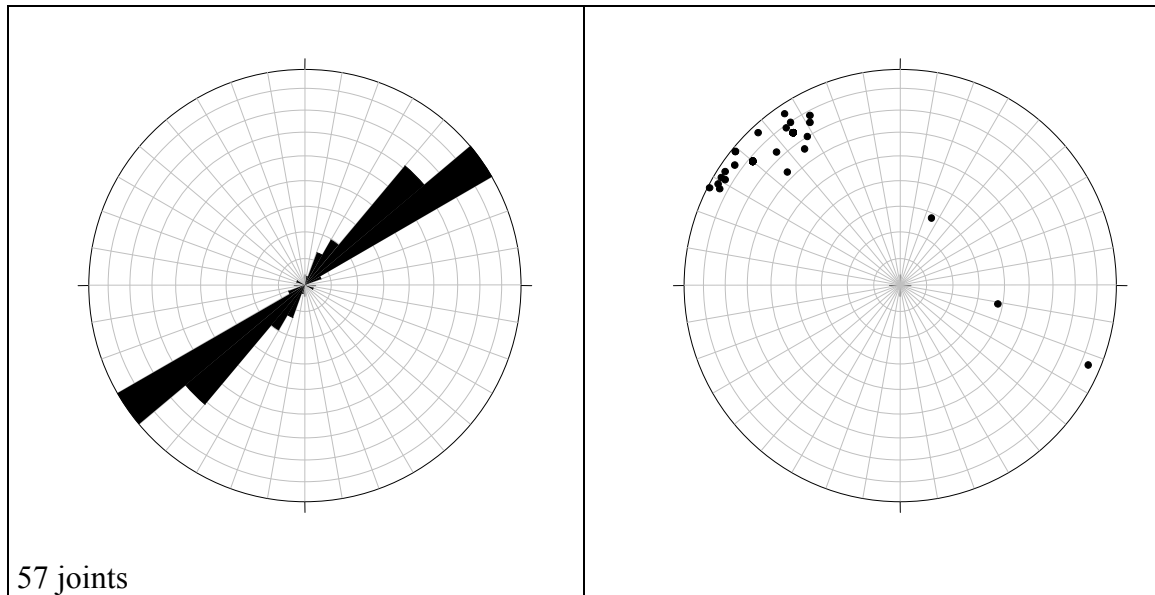


Fig. 15 - Rosace et projection stéréographique dans l'hémisphère de Schmidt inférieure des joints (A, B) de la station 11 de route d'Ilet à Cordes, cirque de Cilaos.

c) Synthèse des observations

Les intrusions de type sills et dykes montrent des orientations connues (Maillot, 1999).

La présence de l'intrusion de microsyénite tardive d'extension kilométrique, recoupant l'ensemble des formations (océanites, dykes) préexistantes constitue une structure majeure à l'échelle du cirque de Cilaos. Il y a plusieurs familles directionnelles de dykes et joints se recoupant, qui favorisent ainsi les intersections inter-fractures et donc la connectivité géométrique. Ces structures étant verticales, cela tendrait à favoriser les transferts de fluides vers la surface. Les formations massives sont globalement peu perméables, les intrusions constituant les principales discontinuités. Les intrusions sont non altérées, les joints sont secs et ne montrent pas de remplissages hydrothermaux,

La fracturation interne de la microsyénite montre une densité élevée de joints. Il n'y a pas de failles pouvant témoigner d'une activité tectonique significative.

2.3.2. Site CILAOS 2 : GR2 Cilaos - rivière Bras Rouge

a) Présentation du site

Ce site se trouve juste au nord-ouest de la ville de Cilaos. Il permet de reconnaître le secteur de la rivière du Bras Rouge en amont de la cascade. Il offre la possibilité (1) d'observer la série des océanites anciennes intrudées par les complexes de dykes et sills et (2) de vérifier les contacts de l'intrusion de microsyénite tardive. Cette portion de la rivière du Bras Rouge orientée N170 est connue pour ses émergences thermales, dont la

source Aval Sentier du Taïbit, qui est la source la plus chaude connue dans le cirque de Cilaos.

Dans la mesure où l'intrusion de microsyénite affleure bien au fond de la rivière, il permet d'observer et de mesurer la fracturation propre à cette intrusion.

L'étude le long de ce profil est composée de 5 stations de mesures et observations qui sont présentées ci-dessous et reportées sur la figure 9.

b) Présentation des observations et mesures

Station 1

Cet affleurement, situé le long du GR2 et sous l'intrusion syénitique de l'Ilet Dijoux, montre un dyke de trachyte frais, d'épaisseur métrique, orienté N169E°84°W, intrusif au sein du complexe de dykes basaltiques anciens et altérés.

Station 2

Depuis le GR2, il apparaît clairement que l'intrusion de microsyénite du Pain de Sucre est intrusive au sein des dykes basaltiques anciens. L'orientation générale de la lame intrusive est WNW-ESE et plonge de 70° vers le nord.

Station 3 (source Aval Sentier du Taïbit)

La source Aval Sentier du Taïbit émerge au niveau du lit de la rivière, à proximité d'un contact entre l'encaissant zéolitisé parcouru des dykes et une apophyse de l'intrusion de microsyénite. Ces dykes ont des directions variables de N35°W à N05°W et plongeant vers l'ouest avec des pendages obliques. Il faut noter qu'au niveau de l'émergence de la source, aucune structure n'est visible.

Des joints obliques à sub-verticaux sont également observés dans l'encaissant avec un réseau se superposant aux dykes précédents (N0° et N145°E) et un réseau sub-perpendiculaire plus discret N65°. Au droit de la source Aval Sentier du Taïbit, s'observe un joint orienté N135°46°W affectant des formations de remaniement (joint tardif probable ?) et au niveau duquel se trouve une petite émergence froide encroûtante avec des dépôts d'hydroxydes de fer.

Les dykes sont principalement orientés N0E à pendage ouest ; les joints se composent de deux familles dominantes N0 et N130E avec une certaine dispersion directionnelle (fig. 16). Dans ce secteur, les méso-structures (joints, dykes) et les méga-structures (axe de la rivière) sont presque parallèles et proches de l'axe nord-sud.

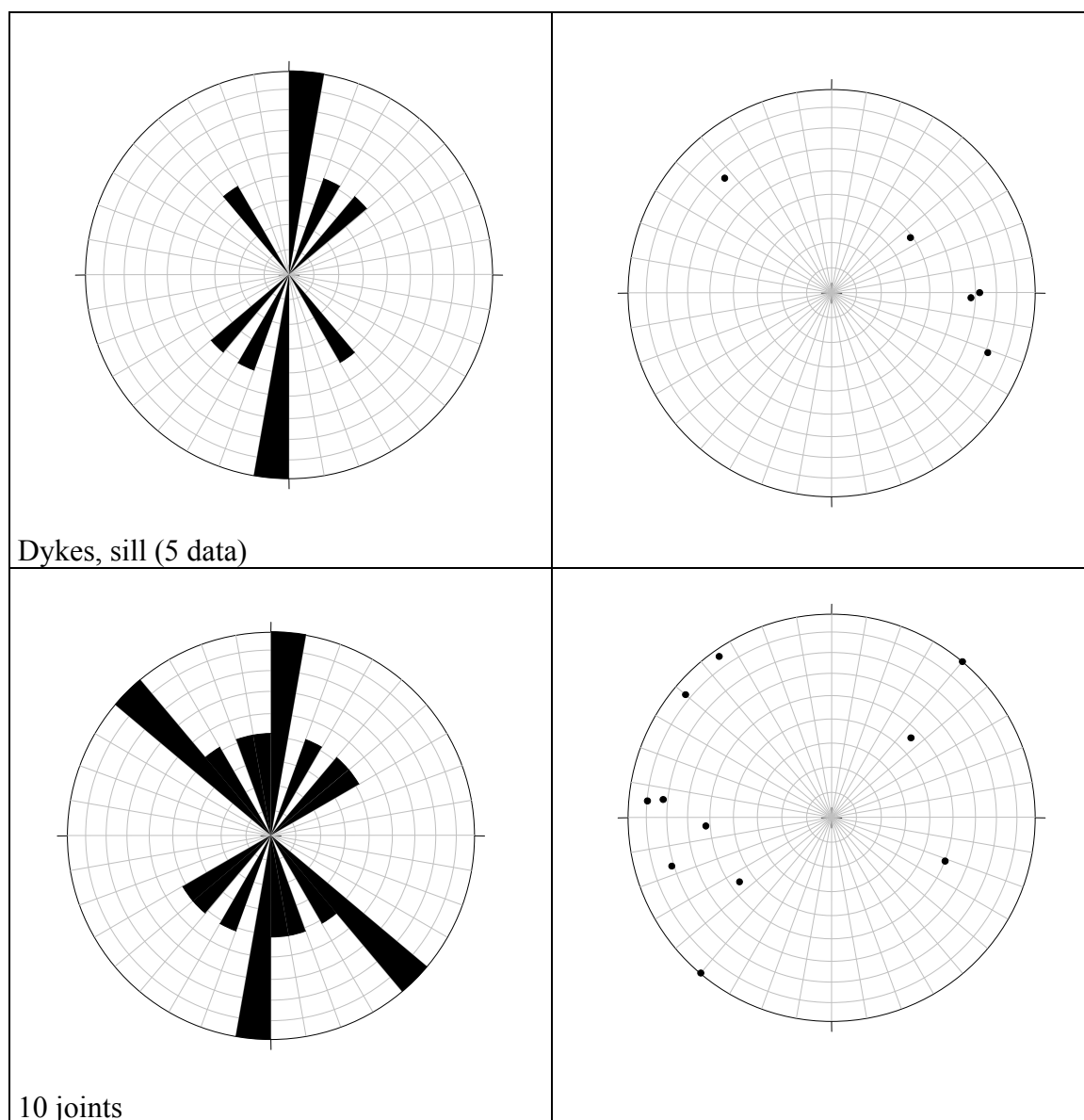


Fig. 16 - Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieure des dykes (A, B) et des joints (C, D) de la station 3 de la rivière du Bras Rouge, source Aval Sentier du Taïbit, cirque de Cilaos.

Stations 4 et 5 (dalle de microsyénite formant le lit de la rivière)

La lame de microsyénite est affectée par un système dense de joints secs plurimétriques ayant une extension verticale de 40 à 50 m. Ces joints sont sécants sur l'axe de la lame, qui est ici orientée N125°.

Des mesures d'espacement et de longueur des traces horizontales de joints secs ont été réalisées sur une dalle horizontale au niveau du toit de la cascade du Bras Rouge (fig. 17). Deux familles de joints s'individualisent : une famille principale subverticale N70° et une famille secondaire N25°, plus rectiligne et plus longue, pourrait être antérieure à la famille N70°, plus irrégulière en relais et plus courte.

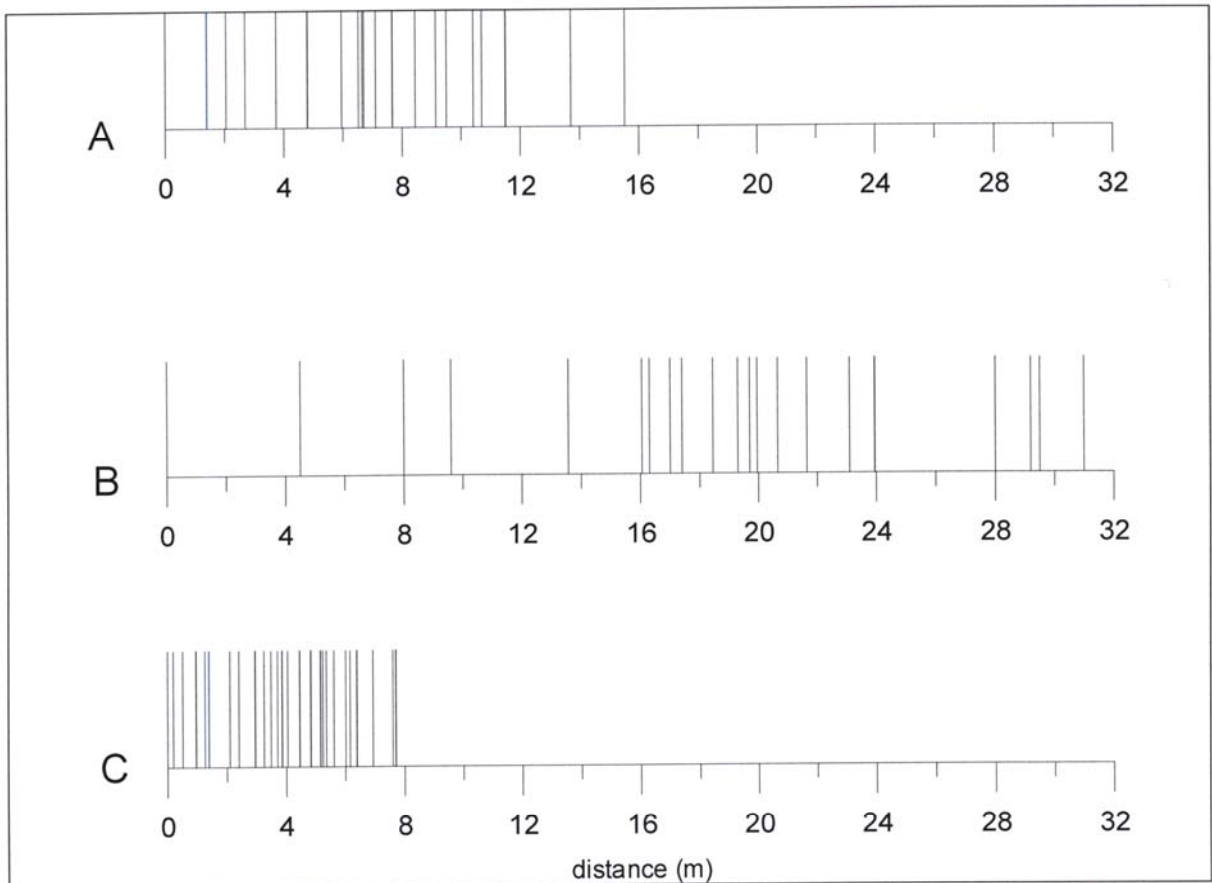


Fig. 17 - Profils de fractures relevées dans le cirque de Cilaos dans la rivière du Bras Rouge, A : station de la Cascade , B : aval de la Chapelle, C : intrusion basique sud de la Chapelle.

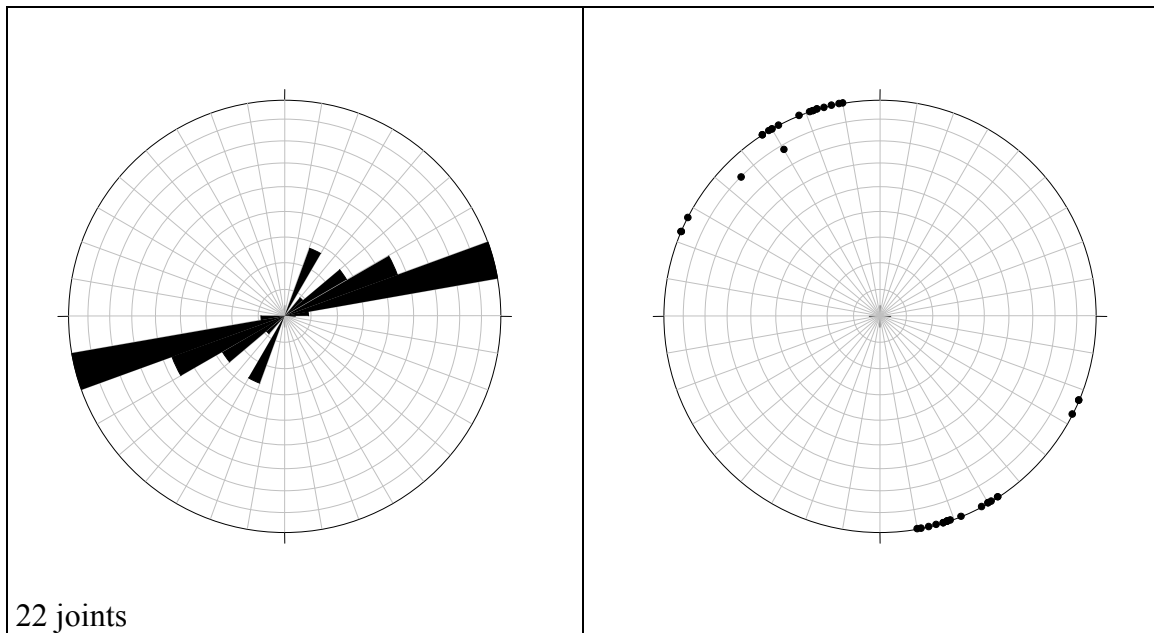


Fig. 18 - Rosace et projection stéréographique dans l'hémisphère de Schmidt inférieure des joints (A, B) des stations 4 et 5 de la cascade de la rivière du Bras Rouge, cirque de Cilaos.

Sur la dalle, la densité brute de fracturation est de 1,2 fract./m. Les joints se répartissent de manière relativement homogène avec une tendance à la concentration au centre du profil (fig. 18A). Au pied de la cascade, une source ayant un fort débit et soulignée par des dépôts d'hydroxydes de fer émerge à proximité du contact vertical entre la lame de microsyénite et l'encaissant (complexe de sills anciens). D'autres sources sont visibles au niveau des berges de la rivière du Bras Rouge, en aval de la cascade.

c) Synthèse des observations

On note le caractère tardif des intrusions trachytiques et syénitiques qui intrudent les formations anciennes du massif du piton des Neiges. La lame de microsyénite est affectée par une fracturation interne avec des joints secs. Ces joints peuvent avoir une extension importante. Leur orientation est proche de celle mesurée sur les profils de la route d'Ilet à Cordes. Une famille principale s'individualise. Les sources connues dans la rivière du Bras Rouge, en amont de la cascade, se situent à environ 100 m du contact de l'intrusion de microsyénite.

2.3.3. Site CILAOS 3 : Bras Rouge - la Chapelle

a) Présentation du site

Ce site se trouve dans la rivière du Bras Rouge en aval de la Chapelle. Il prolonge, vers le sud, les profils effectués dans la rivière du Bras Rouge, en amont de la cascade. Le

contexte géologique est identique avec (1) la série des océanites anciennes intrudées par les complexes de dykes et sills et (2) des intrusions tardives dont la terminaison sud de l'intrusion de microsyénite du Pain de Sucre.

Cette portion de la rivière du Bras Rouge est d'abord orientée nord-sud puis s'incurve vers le sud-ouest.

L'étude le long de ce profil s'appuie sur sept stations de mesures et d'observation qui sont présentées ci-dessous et reportées sur la figure 9.

b) Présentation des observations et mesures

Station 1 (panorama)

Le panorama depuis le GR permet d'observer que la lame de microsyénite, à sa bordure sud, est intrusive dans un encaissant de sills sub-horizontaux avec de rares dykes de trachyte tardifs. En revanche, à sa bordure nord, la lame est intrusive dans un encaissant où des dykes trachytiques sont fréquents. Il est possible que cette lame intrusive représente une limite structurale importante à l'échelle du cirque de Cilaos.

Station 2 (défilé de la Chapelle)

Le défilé de la Chapelle est formé par la lame de microsyénite, très homogène, d'un point de vue pétrographique. Il permet d'observer un réseau de dykes trachytiques intrusifs dans la microsyénite. Leur orientation est WNW-ESE avec un pendage irrégulier. Leur épaisseur est faible (15-30 cm).

Un réseau de joints secs qui s'étend sur toute la hauteur de la paroi de la microsyénite est visible et orienté N35° et N65°.

Au mur d'un système de dykes à pendage variable, des émergences fossiles caractérisées par des dépôts d'hydroxydes de fer et de carbonates, s'individualisent (photo 1). La même observation a été faite au contact de la microsyénite et de son encaissant.

Au pied de la falaise, de petites émergences à débit insignifiant sont soulignées par des dépôts d'hydroxydes de fer et de carbonates. Leurs températures varient de 17,5 à 20,8°C, avec une conductivité de l'ordre de 70 µS/cm.



Photo 1 - Emergences au mur d'un dyke intrudant la microsyénite, la Chapelle, cirque de Cilaos.

Stations 3 et 4 (lit de la rivière en aval de la Chapelle)

Les formations remaniées affleurant au niveau du lit de la rivière (identiques à celles formant le flanc gauche de la vallée du Bras Rouge) sont affectées par plusieurs types de structures : des failles, des joints et des dykes. Des remplissages blanchâtres colmatent à la fois les failles et les joints.

- Les joints forment un réseau principal orienté N20° et un réseau secondaire orienté nord-ouest (fig. 19).
- Les dykes montrent une orientation préférentielle N-S mais nous disposons de peu de mesures.
- 10 failles ont été observées. Certaines sont clairement décrochantes avec une strie oblique ; d'autres comportent une composante verticale plus marquée. Un mouvement dextre de 30 cm de rejet est visible sur une faille N173°E76°W décalant un galet (photo 2). Deux familles directionnelles, très redressées, s'individualisent (fig. 19) : une famille dominante N170°E correspondant à des décrochements dextres et une famille secondaire N20°E correspondant à au moins un décrochement senestre. En termes de paléo-tenseurs, ce type d'organisation conduirait à envisager une compression orientée N10°E.50
- Une émergence est visible au niveau d'un joint N25°.



Photo 2 - Faille décrochante ayant un rejet horizontal de 30 cm, aval la Chapelle, cirque de Cilaos.

Le profil réalisé (fig. 17B) montre une première zone avec des espacements assez lâches correspondant aux dykes puis une zone où la densité de fracturation est plus forte entre 16 et 24 m. Cette zone correspond globalement au passage des failles décrochantes. Quelques joints leur sont spatialement associés. En fin de profil (28-31 m), on retrouve une petite zone plus dense, elle aussi caractérisée par la présence de failles. Globalement, la densité de fracturation brute est faible avec 0,65 fract./m.

Stations 5 et 6

Une émergence fossile est visible en rive droite de la rivière, au sein d'un ensemble de sills.

Plus loin, la présence de quelques dalles au niveau du lit de la rivière montre que la fracturation est quasi-nulle.

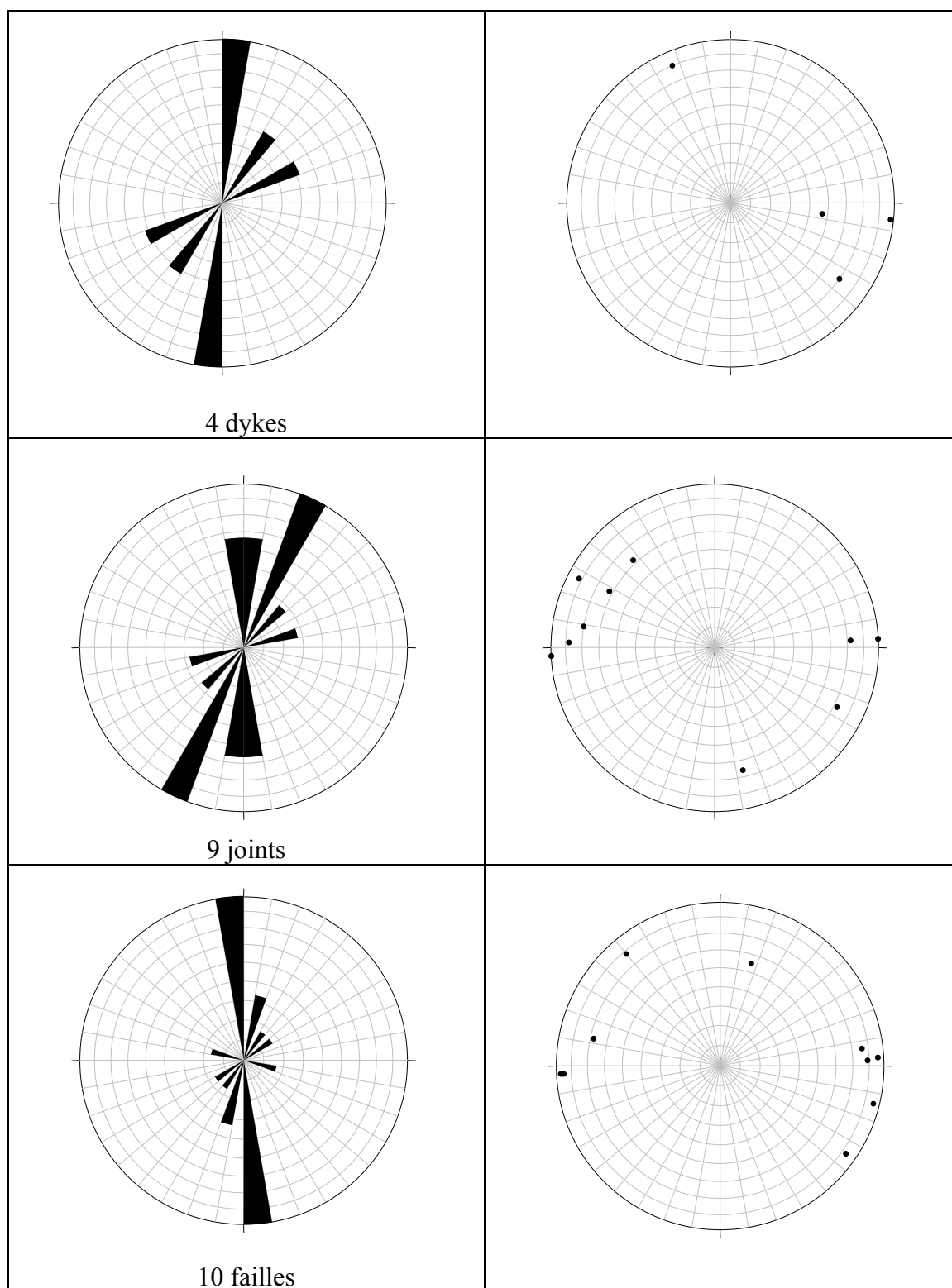


Fig. 19 - Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieure des dykes (A, B), des joints (C, D) et des failles (E, F) des stations 3 et 4 de la rivière du Bras Rouge, la Chapelle, cirque de Cilaos.

Station 7

Cette station se situe au niveau d'un coude de la rivière entaillant un complexe intrusif de roches basiques, qui forme une lame orientée N10°E50°W et de 30 m de puissance. Elle est affectée par un réseau de joints obliques orientés N45°E70°S (fig. 20). Ces joints, auxquels se superpose un réseau de joints sub-horizontaux irréguliers à remplissages blanchâtres d'épaisseur millimétrique sont rectilignes et secs. Deux dykes tardifs intrusifs dans ce complexe sont orientés N170°E.

Les joints obliques développés dans ces intrusions basiques grenues montrent une forte densité de fracturation avec 3,24 fract./m. Les joints systématiques se regroupent en zones plus denses (fig. 17C) pour former des couloirs. L'orientation de ces joints parallèles est N40° à plongement vers le sud-est.

c) Synthèse des résultats

L'intrusion de microsyénite formant le défilé de la Chapelle se caractérise par la présence de joints secs et de dykes dont les orientations N-S à N20°E sont globalement parallèles et obliques sur l'axe de l'intrusion orientée N120°E. De petites émergences sont localisées au mur du contact dyke-encaissant de microsyénite.

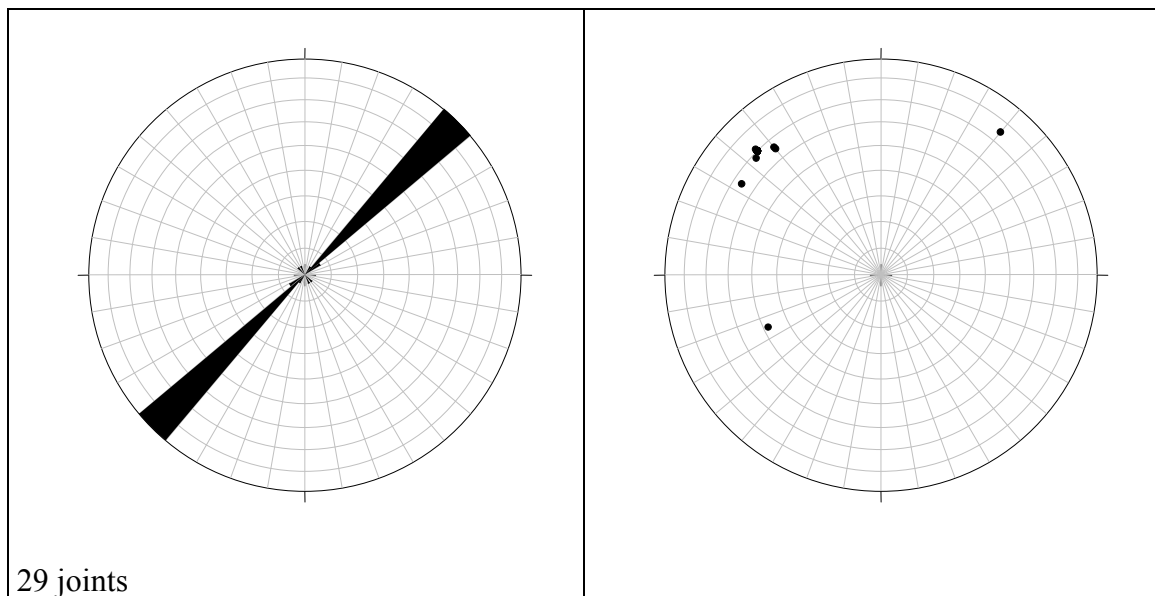


Fig. 20 - Rosace et projection stéréographique dans l'hémisphère de Schmidt inférieure des joints (A, B) de la station 7 de la rivière du Bras Rouge, sud de la Chapelle, cirque de Cilaos.

Le corps intrusif basique, orienté N10°E, affleurant en aval de la Chapelle est, lui aussi, affecté par un dense réseau de joints systématiques, orientés N45°.

Dans ce secteur, les formations d'océanites anciennes et les formations de remaniement plus récentes ont la particularité d'être affectées par des failles décrochantes. Ces failles pourraient témoigner d'un régime compressif subméridien dans l'histoire géologique du cirque.

2.3.4. Site CILAOS 4 : route N5 Cilaos – Saint-Louis

a) Présentation du site

Ce site se situe 500 m avant l'entrée nord du tunnel de Gueule Rouge. Le talus de la route N5 offre l'opportunité d'observer des structures tectoniques et des dykes. Les mesures ont été effectuées sur une seule station (fig. 9).

b) Présentation des observations et mesures

Station 1

Cet affleurement permet d'observer une dizaine de failles avec une composante décrochante dominante. Elles affectent des coulées anciennes zéolitisées ainsi que des dykes orientés N170°E à plongement est. Leur extension est métrique à plurimétrique. Elles sont colmatées par des dépôts blanchâtres d'épaisseur millimétrique.

À l'échelle de cet affleurement, il apparaît que les failles s'expriment préférentiellement dans les dykes, qui jouent ainsi un rôle de guide pour la fracturation. Cette fracturation secondaire post-intrusion correspond à des failles orientées N150 et N170°E. La famille N150E correspond à deux failles dextres et la famille N170E à une faille senestre (fig. 21). En termes de paléo-tenseur, cette organisation de failles en système conjugué serait compatible schématiquement avec une compression orientée N160E. Dans les coulées anciennes zéolitisées, moins compétentes, les plans de faille sont mal exprimés.

c) Synthèse des observations

Comme le site précédent de Cilaos 3, ce site de Saint-Louis permet d'observer un réseau de failles décrochantes dans les formations d'océanites anciennes, compatibles schématiquement avec un épisode compressif sub-méridien. Localement, les dykes sont repris par les failles et servent de guides à la déformation cassante.

2.4. CARACTÉRISATION DES DÉPÔTS HYDROTHERMAUX

2.4.1. Matériel et méthodes

Au niveau des émergences actuelles ou fossiles ou encore de certaines fractures observées lors de la campagne de terrain dans les cirques de Salazie et Cilaos, des dépôts ou encroûtements hydrothermaux ont été échantillonnés et analysés (par

diffraction de rayons X). Les résultats des analyses brutes réalisées par le BRGM, regroupés sous forme de spectres de diffraction, font l'objet d'un rapport séparé (Pedroletti, 2001). Les analyses diffractométriques permettent la détermination de la composition minéralogique des échantillons. Deux types d'analyses ont été réalisées : des analyses sur poudre qui donnent la nature des constituants minéralogiques et des analyses sur lames orientées spécifiques à la détermination des minéraux argileux. La provenance et la description des 8 échantillons analysés sont regroupées dans le tableau 1. Leur localisation est donnée dans la figure 22.

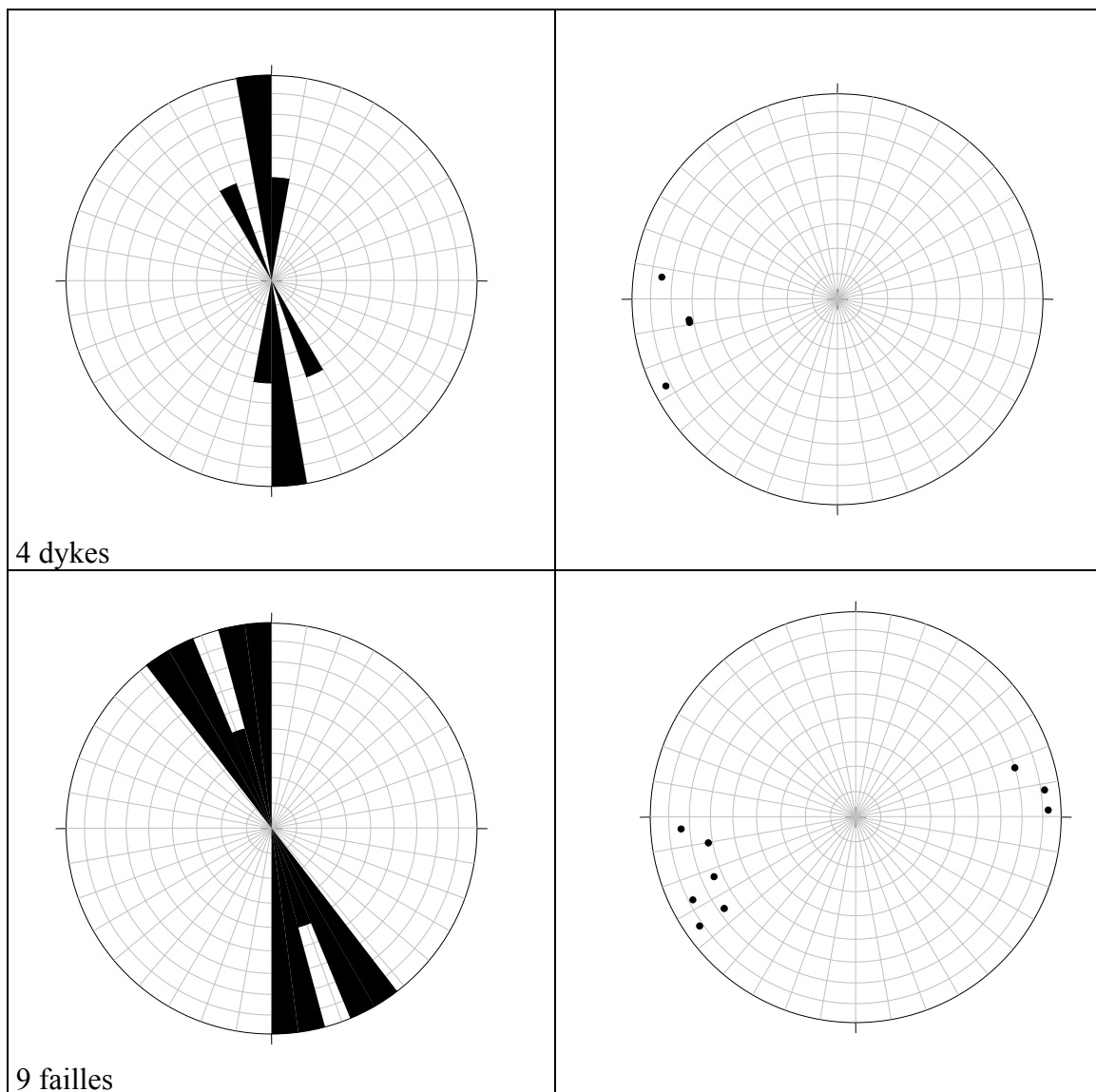


Fig. 21 - Rosaces et projections stéréographiques dans l'hémisphère de Schmidt inférieure des dykes (A, B) et des failles (C, D) de la station 1 de la route N5 Saint-Louis, cirque de Cilaos.

Echantillon	Description	Localisation terrain	Minéraux présents ou supposés
RU1G	Fragment de lave avec encroûtements blanchâtres	Salazie-rivière Mât ravine Olivette	Minéraux blancs (carbonates, effervescence HCl)
RU1H	Placage beige dans le plan de fissure	Salazie-rivière Mât à partir de la route Salazie Hellbourg	Hydroxydes de fer, argiles ?, pas de calcite
RU1K	Echantillon fumerollisé, couleur rouille	Salazie-rivière Mât à partir de la route Salazie Hellbourg	Hydroxydes de fer, argiles ? calcite ?
RU1L	Plaquage rouille à rouge d'échantillon fumerollisé, couleur rouille	Salazie, rivière Fleurs Jaunes, Direction camp Pierrot	Hydroxydes et oxydes de fer, argiles ?
RU1P	Encroûtements blanchâtres sur roche oxydée pulvérulente	Salazie, source Manouilh	Hydroxydes de fer, argiles ? calcite (effervescence HCl)
RU1V	Fragment de travertin	Salazie, rivière Du Mât à partir de la source pétrifiante, source	Calcite (effervescence HCl) + autres minéraux
RU2C	Travertins lités jaunâtres avec horizons rouilles	Cilaos, La Chapelle, Bras Rouge, proche syénite	Calcite (effervescence HCl)
RU2H	Remplissage de faille	Cilaos, La Chapelle, Bras Rouge	Pas de calcite

Tabl. 1 - Caractéristiques des 8 échantillons analysés par diffraction de rayons X.

2.4.2. Minéraux analysés

L'analyse aux rayons X des 8 échantillons sélectionnés permet de mettre en évidence quatre grandes familles minéralogiques de dépôts associés aux émergences ou aux fractures (tabl. 2) :

- Les carbonates. Il s'agit principalement de carbonates de calcium (calcite) ou de ses polymorphes (aragonite, vaterite), de magnésium (magnésite) ou de fer (ankérite). La calcite est largement dominante à la source Manouilh ou dans le cirque de Cilaos (la Chapelle). Ils sont présents dans tous les échantillons sauf dans la fracture (RU2H) et dans une source du cirque de Salazie (RUIK, rivière du Mât).
- Les argiles. Il s'agit exclusivement de smectite qui est une argile gonflante. Elle est présente dans tous les échantillons sauf dans celui de la chapelle de Cilaos (RU2H) et dans une source du cirque de Salazie (RUIK, rivière du Mât).



Echantillon	Localisation terrain	Carbonates	Argiles	Oxydes de fer	Divers
RU1G	Salazie-rivière Mât. ravine Olivette	Ankérîte, Aragonite	Smectite	Hématite	Amorphe
RU1H	Salazie-rivière Mât à partir de la route Salazie Hellbourg	Aragonite	Smectite	Goethite	Amorphe
RU1K	Salazie-rivière Mât à partir de la route Salazie Hellbourg		Pas d'argiles	Maghemite	Amorphe
RU1L	Salazie, rivière Fleurs Jaunes, Direction camp Pierrot	Vaterite, Magnésite	Smectite		Amorphe
RU1P	Salazie, source Manouilh	90% Calcite	Smectite		
RU1V	Salazie, rivière du Mât à partir de la source pétrifiante, source	40% Calcite	Smectite		Amorphe
RU2C	Cilaos, La Chapelle, Bras Rouge, proche syénite	100 % Calcite			
RU2H	Cilaos, La Chapelle, Bras Rouge		Smectite		Prehnite, Amorphe

Tabl. 2 - Minéraux mis en évidence par diffraction de rayons X. La phase dominante a été surlignée en gras.

2.5. LE MASSIF DU PITON DE LA FOURNAISE

2.5.1. Les traits structuraux majeurs du volcan actif

Les grandes caractéristiques volcano-structurales du massif du Piton de la Fournaise sont assez bien illustrées à partir d'une analyse de sa topographie d'ensemble (fig. 23). En effet, la particularité de ce massif volcanique actif est l'existence de grandes structures tectoniques de forme concentrique (Bachelery et Mairine, 1990). Ces structures sub-circulaires sont « ouvertes » vers l'est, c'est-à-dire vers l'océan et se calquent sur les accidents topographiques, qui forment donc leurs bordures occidentales. Depuis les cratères sommitaux du volcan (Dolomieu, Bory), en se déplaçant vers l'ouest, on rencontre successivement :

- (1) la bordure occidentale de l'Enclos, bordure extrêmement nette et bien individualisée avec des variations d'altitude de l'ordre de 200 m. Des arcs relativement accentués se dessinent dans la topographie et forment des festons au nord, à l'ouest et au sud de l'Enclos. Vers l'est, les branches de ces accidents s'amortissent légèrement et se relaient pour atteindre la mer avec une direction générale est-ouest ;
- (2) le Rempart des Sables montre également des variations d'altitude de l'ordre de 150 m. Géométriquement, sa bordure occidentale se calque bien sur celle du rempart précédent de l'Enclos. En revanche, ses terminaisons vers l'océan sont moins bien individualisées ;
- (3) plus vers l'ouest, on rencontre le système double morne Langevin - rivière des Remparts, qui a une géométrie de détail plus complexe que les remparts plus internes. Sa forme n'est plus réellement circulaire à l'échelle du massif. En effet,

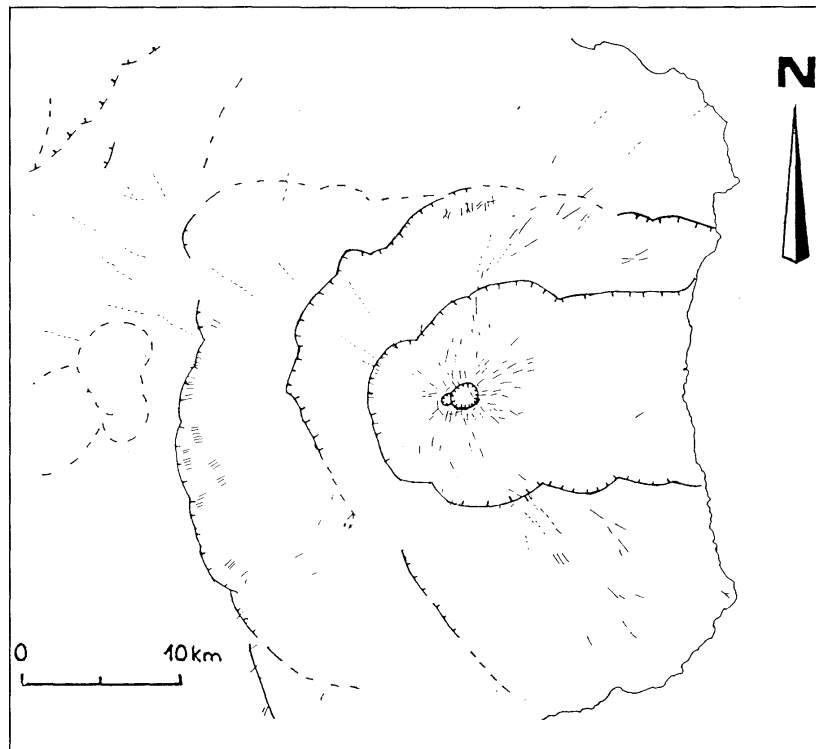


Fig. 23 - Les grandes structures concentriques du massif du piton de la Fournaise et sa fracturation associée.

il s'agit principalement de structures d'orientation générale NNW-SSE dont les branches sud se prolongent en mer au niveau de la pointe de Langevin et de Saint-Joseph. Les fortes variations d'altitude de ces limites de dépressions sont interprétées comme des structures caldériques composées de failles d'effondrement à fort pendage. La zone active actuelle est elle-même située au sein de la vaste caldeira de l'Enclos. Tous les auteurs s'accordent à y reconnaître une structure d'effondrement dans sa partie amont, sa partie aval subissant un vaste glissement vers la mer. Il est probable que ce flanc est du volcan a subi plusieurs épisodes de glissement donnant naissance à de vastes avalanches sous-marines dont les débris associés ont été cartographiés à partir de mesures bathymétriques.

La cartographie des coulées de lave récentes (depuis 1972) de La Fournaise montre que la quasi-totalité de celles-ci est cantonnée à l'intérieur de la caldeira sommitale de l'Enclos et a pour origine les cratères sommitaux et/ou des zones fissurales situées dans son enceinte. La zone la plus active du volcan, matérialisée par les cratères sommitaux, serait localisée à l'aplomb d'un réservoir magmatique situé entre 1 et 2,5 km de profondeur (Lénat et Bachelery, 1990).

L'autre grand trait structural du volcan du piton de La Fournaise (Duffield *et al.*, 1982), est l'existence sur les flancs nord-est et sud-est, de zones privilégiées d'injections de magma issues du réservoir magmatique superficiel, situé à l'aplomb des cratères

sommitaux, et qui donne lieu parfois à des éruptions fissurales hors Enclos comme en 1977 et 1986. Lénat *et al.* (2000) assimilent ces zones à des « rifts diffus », par comparaison avec les vrais rifts du volcan Kilauea à Hawaï. Ils ont une réalité morphologique bien marquée au niveau du trait de côte. En revanche, ils ne possèdent pas les caractéristiques propres aux rifts « hawaïens » (failles normales, fissures éruptives), qui traduisent un régime tectonique d'extension. De plus, il ne semble pas qu'il y ait de concentration de dykes ou de petits réservoirs magmatiques à l'aplomb de ces rifts diffus à La Fournaise, comme cela est envisagé pour les rifts du Kilauea.

2.5.2. La fracturation du volcan

Une des caractéristiques du système de fractures du massif du piton de la Fournaise est l'existence de systèmes de fracturation radiale (fig. 24), qui traduisent les effets des évolutions morphologiques et volcaniques de type gonflement, effondrement et éruption.

Au niveau de la zone centrale des cratères Bory et Dolomieu, on distingue :

- un système franchement radial et centré sur la zone des cratères. Dans le détail, il semble que la fracturation d'extension hectométrique soit plus dense sur l'axe est-ouest. L'emprise de cette zone à fracturation radiale reste cantonnée à l'Enclos et ne déborde pas ou peu sur les autres structures concentriques. Cette fracturation pourrait traduire pour Stieltjes (1986, 1995), le gonflement du cône central sous l'effet de la montée de magma des éruptions sub-actuelles (fig. 24) ;
- un système de fractures d'extension hectométrique, relativement concentrées et orientées NNW à NW au sud, N-S au niveau du cratère et enfin, NNE à nord-est vers le nord. Lorsqu'on s'éloigne de la zone des cratères sommitaux et de l'Enclos, l'incurvation de ce système se prononce (fig. 24). Ce système est également visible sur le fond du cratère Dolomieu, ce qui lui donnerait un caractère plus récent. A l'échelle

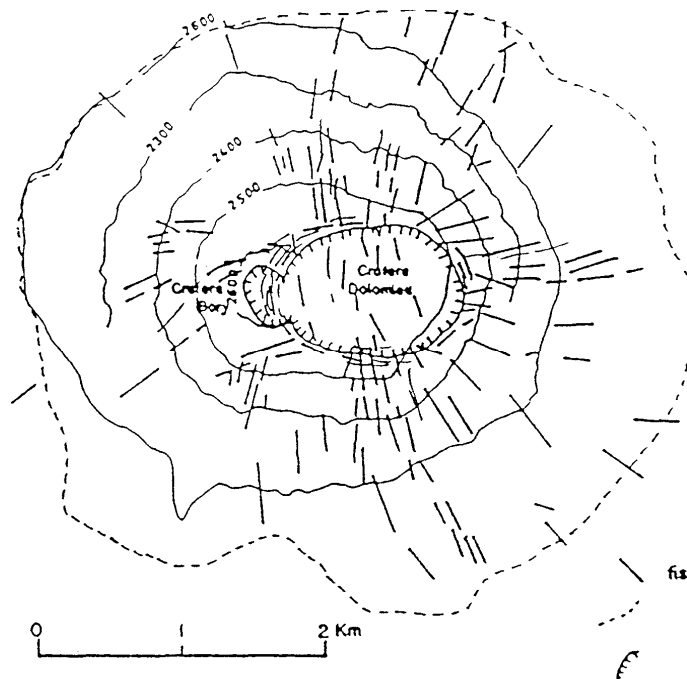


Fig. 24 - Fracturation de la zone sommitale du volcan de la Fournaise (Stieltjes, 1986).

pluri-kilométrique, ce système dessine donc une sorte de parabole sécante sur les remparts qu'elle traverse. Près de 90 % des éruptions historiques prennent naissance dans cette zone de fracturation qui traduirait une zone de rift diffus (Stieltjes, 1986). Pour ce même auteur, cette zone de fracturation représenterait la trace actuelle d'une probable collapse de la partie orientale du volcan qui serait en train de glisser vers la mer (fig. 25). Ce système lié au « rift actuel » semble sécant sur la fracturation radiale. Ce vaste mouvement gravitaire d'ensemble vers l'est symbolisé par une flèche (fig. 25), se traduirait par des failles avec une composante cisailante senestre au nord-est et dextre au sud-est.

Plus vers l'ouest, un système plus ou moins diffus de fractures orientées WNW-ESE se développe à partir du cratère central en direction de la plaine des Cafres (fig. 25). Stieltjes (1986) qualifie ce système de sécant sur les remparts de rift N120E.

2.5.3. Le système hydrothermal

La synthèse des données hydrogéologiques et les modèles de circulation au sein du massif du piton de La Fournaise ont déjà été présentés dans le bilan des connaissances sur le potentiel géothermique de l'île de La Réunion (Sanjuan *et al.*, 2000).

La structure interne du volcan à l'aplomb de la zone sommitale active a pu être interprétée grâce à différentes campagnes de sondages électriques et électromagnétiques

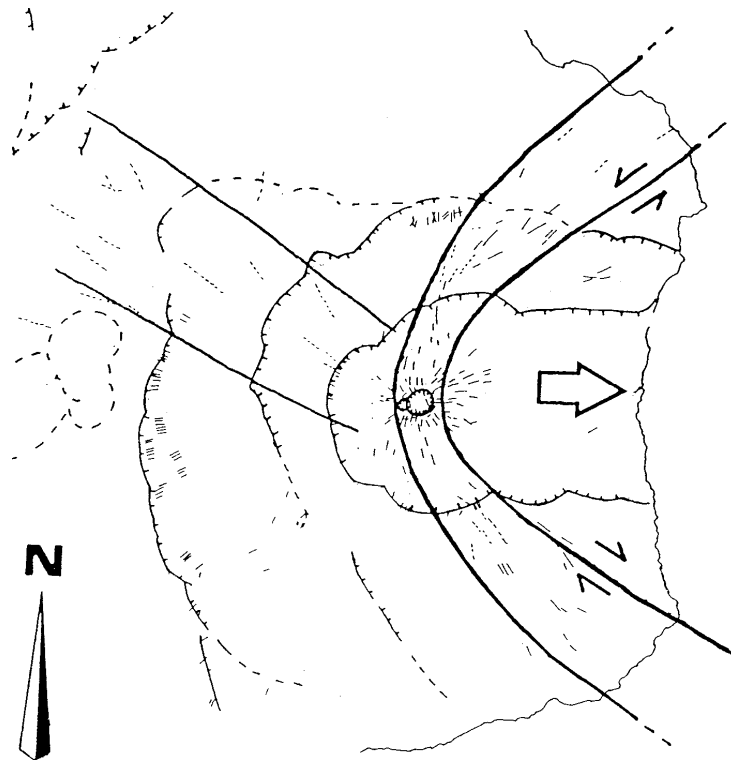


Fig. 25 - Interprétation des structures volcano-structurales du massif du piton de la Fournaise (Stieltjes, 1986).

(Bachelery et Lénat, 1993 ; Zlotnicki *et al.*, 1994). La présence d'une zone à faible résistivité sous la zone sommitale traduirait la présence d'un système hydrothermal. Un modèle récent de la structure interne du volcan (fig. 26) suggère la superposition d'un système hydrothermal profond et superficiel (Lénat *et al.*, 2000). Dans ce modèle, les failles latérales n'atteignent pas les zones réservoir supposées car leur prolongement en profondeur n'est pas connu. De ce fait, il n'y a pas d'évidence d'extension de ce système au-delà de la partie sommitale et notamment dans les zones périphériques en dehors de l'Enclos.

2.6. ANALYSE STRUCTURALE

2.6.1. Rappel des données existantes dans les cirques d'après la bibliographie

Les données existantes sur la fracturation dans les cirques du massif du piton des Neiges proviennent quasi-exclusivement de l'analyse morphologique et de l'examen des photo aériennes. Une seule faille observée sur le terrain est mentionnée dans la bibliographie (Rocher, 1988).

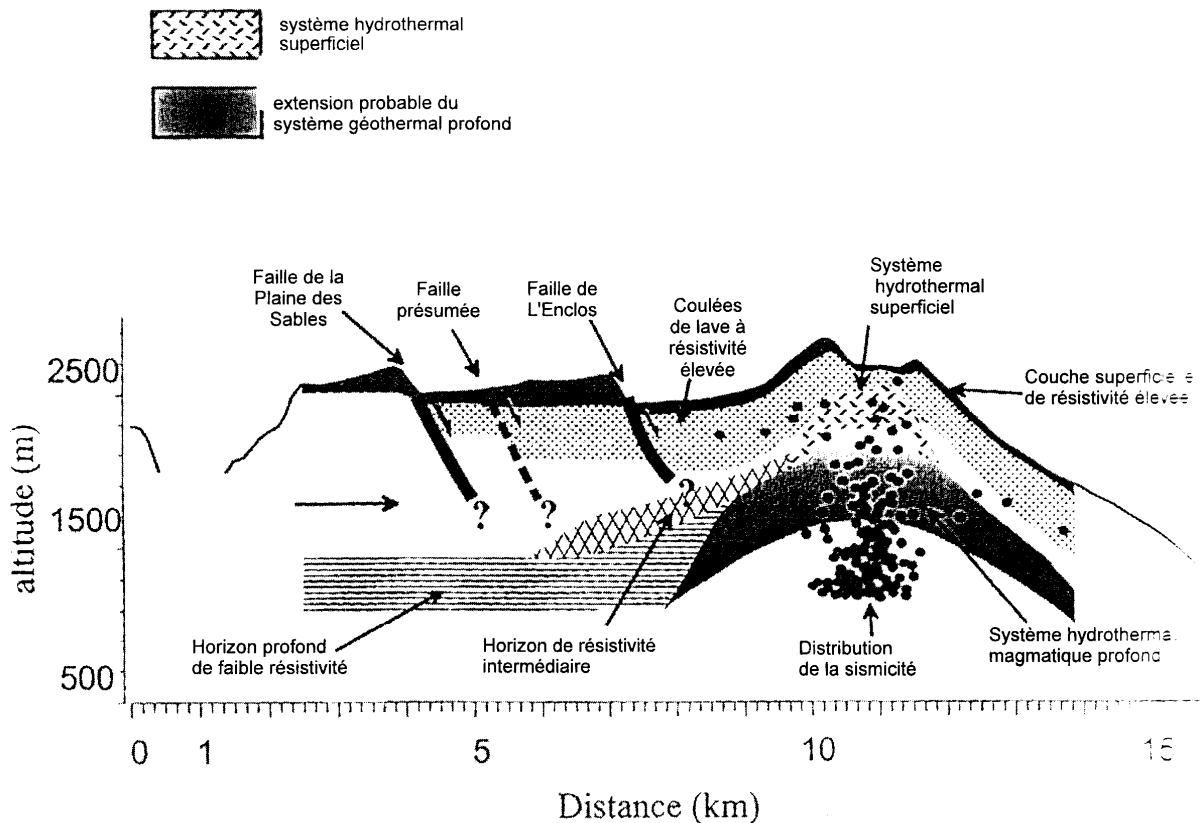


Fig. 26 - Coupe interprétative de la structure interne du massif du piton de La Fournaise, d'après des mesures géophysiques (Lénat *et al.*, 2000).

En revanche, les données sur les dykes et les intrusions, qui constituent une source d'information sur la fracturation volcano-tectonique du massif, sont nombreuses. La dernière étude en date (Maillot, 1999) brosse un aperçu complet sur ce type de structures volcano-tectonique dans le cirque de Cilaos.

a) Analyse des photos aériennes

Le cirque de Salazie affleure sur 10 km de diamètre et forme la partie septentrionale du piton de Neiges. Ses bordures sont constituées par des remparts abrupts. Le cirque de Cilaos affleure également sur une dizaine de kilomètres de diamètre et forme la partie méridionale du massif du piton des Neiges. Les bordures des cirques correspondent aux remparts qui ont entaillé sur plus de 1 500 m de profondeur les parties internes du massif volcanique. L'intérieur des cirques se compose de deux types de morphologie caractéristique : les ravines qui incisent et découpent les zones profondes du substratum et les îlets ou plateaux qui correspondent souvent à des formations de remaniement (panneaux effondrés).

L'analyse des photos aériennes du cirque de Salazie, combinée à des contrôles de terrain quand les conditions d'affleurement le permettaient, a permis à Rocher (1988) de distinguer cinq familles principales directionnelles de linéaments interprétés en termes de photo-fractures. La direction N160-170 est dominante par rapport aux axes N110-120, N70-80, et N30/35-45 et N10-20 (tabl. 3). Les familles de photo-fractures correspondraient à des structures verticales qui compartimentent le substratum du cirque. Ces directions se calquent sur les directions des systèmes filoniens (dykes).

Pour Rocher (1988), l'événement structural majeur serait daté aux alentours de 70 000 ans et se traduirait par une phase tectonique distensive qui a entraîné l'effondrement de la partie interne du cirque. Elle se caractériserait par un système de failles normales bordières orientées N30-35°E avec un rejet vertical de l'ordre de 400-500 m.

Dans la zone amont du cirque de Cilaos, Maillot (1999) précise que l'analyse des photos aériennes et des levés géologiques montre une fracturation importante. Tous les terrains sont affectés soit par des structures gravitaires généralement de forme semi-circulaire, soit par des fractures d'origine tectonique de forme plus rectiligne. Par ailleurs, cet auteur mentionne qu'il est difficile sur le terrain d'observer directement ces structures et donc d'en différencier l'origine gravitaire ou tectonique en raison de l'absence de critères de cisaillement (stries, miroir de faille). Les directions dominantes sont orientées N60-N70° et N10-N20° et correspondent à des traits morphologiques. Les directions secondaires sont orientées N30-N40°, N100-N110°, et N140° (tabl. 3). Le système N30-40° correspond à des axes morphologiques ou des linéaments hydrogéologiques (ravines), le système N100-110° est associé aux intrusions tardives de la Chapelle et le système N120-140° représente également des linéaments morphologiques. Les formations géologiques présentes correspondent aux océanites anciennes et récentes, à des systèmes intrusifs de dykes et sills et à des intrusions de gabbro et de microsyénite. Des intrusions sont localisées au nord-ouest du cirque dans la rivière du Bras Rouge et au niveau de la route D242 (îlet à Cordes).

Le système intrusif le plus développé dans le cirque de Cilaos est constitué par une lame formant l'ensemble Pain de Sucre - la Chapelle qui est orientée N120° avec un fort pendage vers le nord, c'est-à-dire vers le cœur du massif du piton des Neiges. Pétrographiquement, il s'agit de roches différenciées à textures grenues à microgrenues correspondant principalement à un ensemble de syénites et de monzosyénites. Elles résultent d'une cristallisation d'un magma fortement différencié, riche en éléments alcalins et halogènes. Ce système intrusif décrit comme concentrique est interprété par Rocher (1988) comme un « cone-sheet » lié à une structure caldérique.

Les intrusions basiques de nature monzogabbroïque observées dans la rivière du Bras Rouge représenteraient un émissaire filonien constituant de l'apex du complexe annulaire (Rocher, 1988).

Salazie (Rocher, 1988)		Cilaos		
Photo aérienne	Mesure sur dykes	Photo aérienne	Mesure sur dykes Chevalier 1979	Mesure sur dykes Maillot 1999
① N160-170	① N115-125	① N60-70	① N0-10	① N55±5°
	① N145-155	① N10-20		① N35±10°
	① N160-170			① N15±5°
② N110-120	② N20-30	② N30-40		② N75±5°
② N70-80	② N40-50	② N100-110		② N165±10°
② N30-35/45	② N80-90	② N140		② N115±5°
② N10-20				

Tabl. 3 - Familles directionnelles (① majeure, ② secondaire) des linéaments photo géologiques et des réseaux de dykes dans les cirques de Salazie et Cilaos, d'après la littérature.

b) Données existantes sur les dykes et les intrusions

L'inventaire des dykes dans les cirques du massif du piton des Neiges (Robert, 1980) met en évidence plusieurs familles directionnelles. Deux types de structures se différencient (Rocher, 1988) :

- des rifts au sens hawaïen du terme dont les structures ou intrusions qui les composent sont parallèles aux axes d'injection du magma. Il s'agit des directions N115-125, N145-155 et N160-170, la famille dominante étant N145-155 ;
- des systèmes radiaux, c'est-à-dire en éventail sur le volcan. Ils sont orientés N20-30, N40-50 et N80-90, sont nettement moins bien représentés que les dykes liés aux rifts précédents.

Dans le cirque de Salazie, les axes gravimétriques lourds sont N40-50 et N80-90 (Demange *et al.*, 1989). Ils pourraient correspondre à des systèmes filoniens enfouis.

Dans le cirque de Cilaos, Chevallier (1979) souligne l'importance de l'axe 0-10 matérialisant un paléo-rift de type hawaïen. Pour Maillot (1999), l'analyse des orientations des intrusions dans le cirque de Cilaos montre par ordre d'importance décroissant :

- un axe d'injection principal orienté N55 ± 5° ;
- deux autres axes d'injection relativement importants orientés N35 ± 10° et N15 ± 5° ;
- des axes d'injection secondaires orientés N75° ± 5°, N165° ± 10° et N115 ± 5°.

D'autre part, Maillot (1999) a montré que les intrusions de puissance inférieure à 2,6 m et de composition principalement basaltique, intermédiaire et différenciée ont principalement une orientation N25 et N55. Pour les intrusions les plus épaisses, de 6 à 70 m, et de nature principalement syénitique ou gabbroïque, c'est la direction N120 qui domine largement, l'axe N55 devenant secondaire.

Pour mémoire, on peut rappeler que les directions des zones de rift sur le massif du piton de la Fournaise, telles qu'elles ont été interprétées par Lénat *et al.* (2000), sont NE-SW, NW-SE et WNW-ESE.

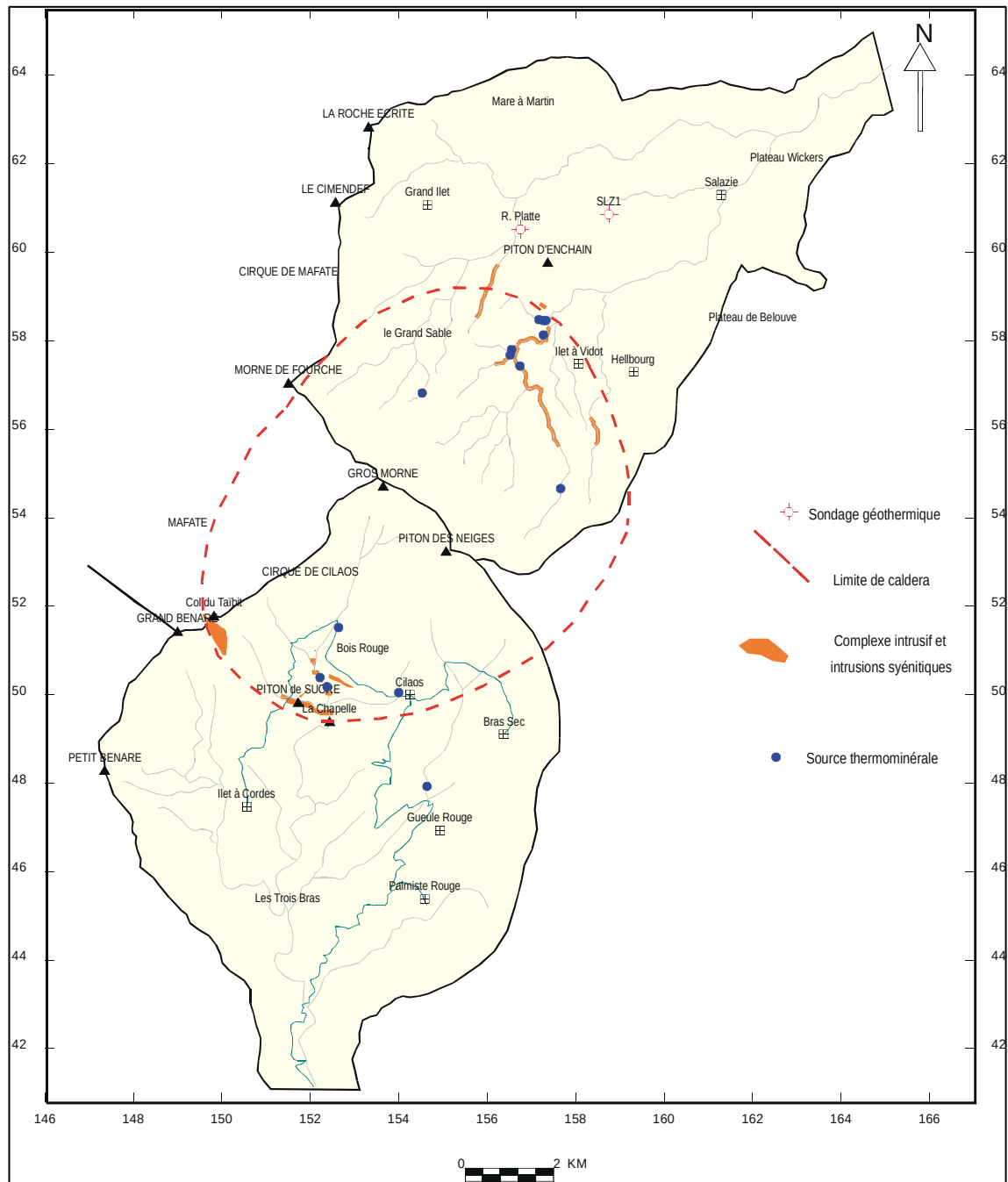


Fig. 27 - Carte des intrusions dans les cirques de Salazie et Cilaos.

Maillot (1999) fournit également une analyse en densité surfacique d'occurrence des intrusions à l'intérieur du cirque de Cilaos. Elle montre que les secteurs les plus denses avec 75 % à 82 % d'injection sont centrés sur le milieu de la rivière du Bras Rouge et à proximité de la bordure nord du Pain de Sucre sur la route d'Ilet à Cordes. La zone à densité maximale d'intrusions de la rivière du Bras Rouge se superpose avec l'anomalie gravimétrique visible sur la carte des anomalies de Bouguer de La Réunion (fig. 27). En effet, dans le cas de l'injection de roche basique, les densités sont élevées et influencent le champ de pesanteur.

2.6.2. Données nouvelles de fracturation dans les cirques apportées par cette étude

Les reconnaissances de terrain effectuées dans le cadre de cette étude étaient axées sur l'analyse et le relevé de structures tectoniques et volcano-tectoniques. Le temps imparti à cette étude ne permettait pas une reconnaissance exhaustive de l'ensemble des cirques et les sites d'étude avaient été sélectionnés en fonction de leur représentativité. Bien que quantitativement plus faibles en nombre, les observations et mesures réalisées peuvent donc être discutées et comparées avec les données acquises précédemment lors de travaux antérieurs comme ceux des thèses de Rocher (1988) et de Maillot (1999).

En plus des structures intrusives (dykes, sills) déjà connues, cette étude a permis d'identifier et de mesurer des structures tectoniques de type joints et failles en nombre limité. Il semble donc que les structures tectoniques « franches » soient peu représentées dans le massif du piton des Neiges. Les principales discontinuités verticales à sub-verticales sont donc attribuables aux réseaux intrusifs qui résultent de la fracturation du milieu rocheux concomitante de la mise en place de magma lors des différentes phases d'édification du massif volcanique.

a) Réseaux de dykes et de sills

Les structures volcano-tectoniques sont omniprésentes dans les cirques. Dans le cirque de Salazie, les directions des dykes et des sills sont relativement variables d'un site à l'autre (fig. 28). Ceci rejoint les observations de Rocher (1988). Les dykes sont orientés NNE à NNW à l'est (Salazie 4), ESE-WNW au centre (Salazie 1, Salazie 6) et NW-SE au centre et au sud (Salazie 5, Salazie 6). Par rapport aux structures d'origine volcano-tectonique du massif du piton des Neiges, les dykes subméridiens sont localisés préférentiellement à l'extérieur de la structure caldérique supposée. Ceux situés à l'intérieur montrent des orientations NW-SE et NNW-SSE (Salazie 5, Salazie 6). Ceux situés sur la bordure de la caldeira (Salazie 1, rivière du Mât) sont tangents.

Dans le cirque de Cilaos, la direction des sills et des dykes, apparaît relativement stable, évoluant entre les axes N-S et NNE-SSW (fig. 28). Localement, les directions NE-SW voire NW-SE apparaissent comme secondaires. Les deux sills tardifs observés dans les intrusions de microsyénite de la Chapelle et non reportés dans les projections stéréographiques, ont des orientations très différentes (ESE-WNW).

La direction sub-méridienne mise en évidence dans cette étude s'écarte des conclusions de Maillot (1999) qui donnait une orientation dominante des dykes N55. En revanche, elle est cohérente avec les travaux de Chevalier (1979).

b) Corps intrusifs de grande dimension

Des corps intrusifs de dimension hectométrique à kilométrique ont été mis en place dans les deux cirques de Salazie et Cilaos et sont observables aujourd'hui grâce à l'érosion. De par leur dimension, ces structures représentent les principales discontinuités sub-verticales au sein du substratum et ceci explique l'intérêt qui leur a été porté lors des travaux antérieurs et au cours de cette étude. La mise en place de ces structures est reliée à un événement important et récent dans l'histoire du massif volcanique, à savoir la formation d'une caldeira consécutive à l'éruption de magma différencié. La géométrie de ces corps intrusifs qui diffère selon les cirques a déjà été largement abordée par les précédents auteurs.

Dans le cas du cirque de Cilaos, l'étude récente de Maillot (1999) fait le point complet sur la géométrie des corps intrusifs. On retiendra que les intrusions principales (Pain de Sucre, La Chapelle) se présentent comme des lames subverticales de direction moyenne N120° et plongeant de 60° environ vers le nord-est, c'est-à-dire vers le cœur du massif. Les nouvelles données apportées par cette étude concernent seulement la présence de réseaux de joints secs (*cf.* § 2.6.2.c) qui se développent au cœur des intrusions de microsyénites du Pain de Sucre et de la Chapelle. Une seconde observation importante, déjà soulignée par les travaux antérieurs, concerne la relation spatiale entre les corps intrusifs et les émergences thermo-minérales dans les deux cirques (*cf.* § 2.6.3).

c) Carte des joints

Dans le cirque de Salazie, les joints sont majoritairement orientés NW-SE à NNW-SSE (Salazie 1, Salazie 2, Salazie 4, Salazie 5). Plus localement, les directions E-W (Salazie 6) et NE-SW s'individualisent (Salazie 1). Il n'apparaît pas de différences notables entre les directions des joints observés à l'intérieur ou à l'extérieur de la structure caldérique (*fig.* 29).

À Cilaos, il faut distinguer deux types de joints (*fig.* 29) ; ceux mesurés dans les intrusions syénitiques ou basiques et ceux observés dans les dykes ou dans les océanites :

- la centaine de joints secs observés dans les corps intrusifs de grande dimension (Pain de Sucre, cascade Bras Rouge, la Chapelle) correspond à un réseau de joints systématiques très bien réglé directionnellement NE-SW à WSW-ENE. Ces joints sont par conséquent obliques sur la direction moyenne N110-120E des corps intrusifs qu'ils affectent ;
- les quelques joints secs ou minéralisés observés en dehors des lames intrusives montrent des directions plus dispersées. Au nord (D242, Nord Bras Rouge), les directions des joints sont N-S, NNE-SSW, NE-SW et NW-SE. On retrouve donc les directions de joints similaires à celles observées dans le cirque de Salazie. Au sud de la Chapelle (Cilaos 3), les joints associés spatialement aux petites failles sont orientées N-S à NNE-SSW. Leur géométrie est voisine de celle de failles.

L'absence d'information sur les joints dans les travaux antérieurs (Rocher, 1988, Maillot, 1999) ne permet pas de faire des comparaisons.

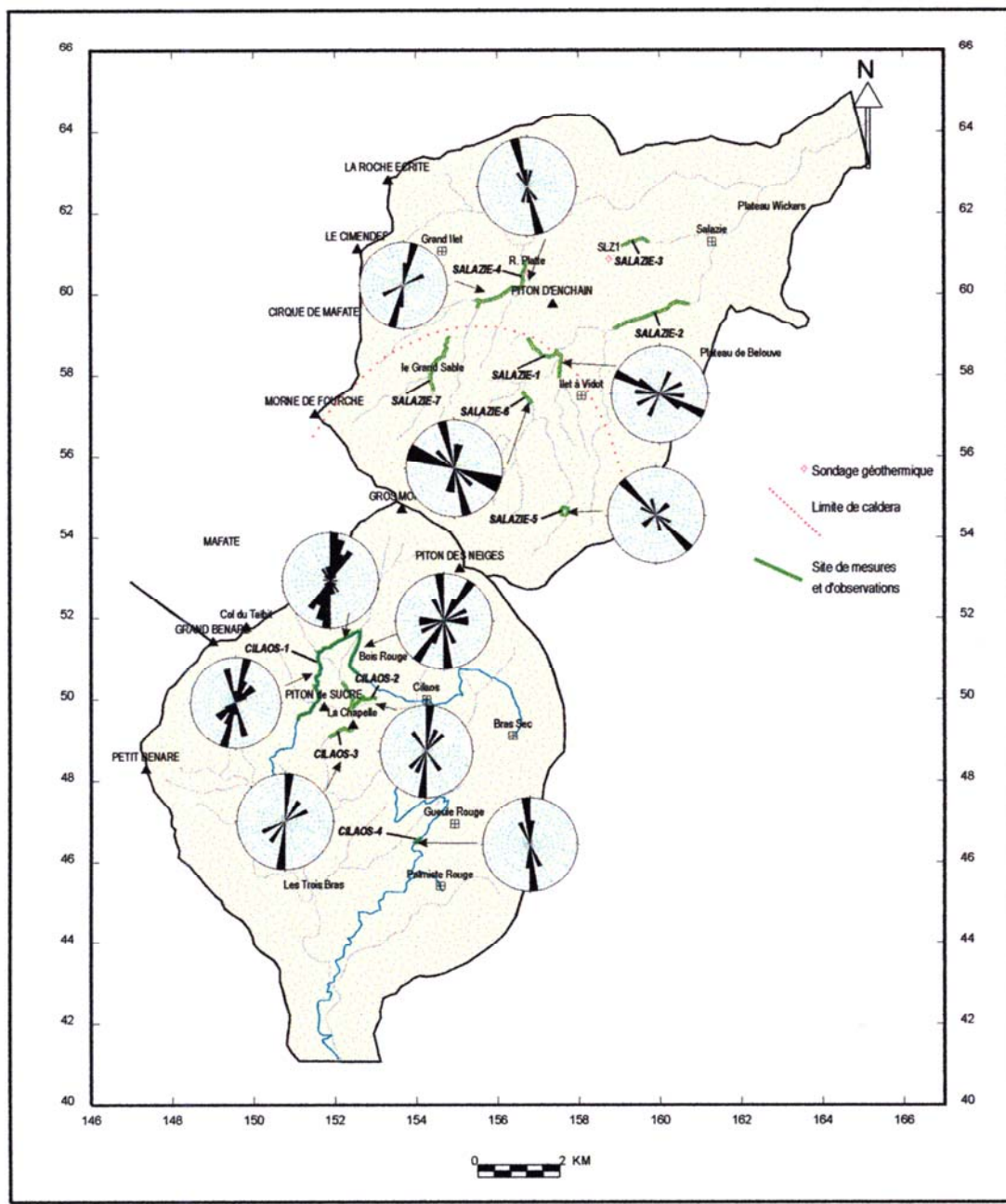


Fig. 28 - Carte des dykes dans les cirques de Salazie et Cilaos.

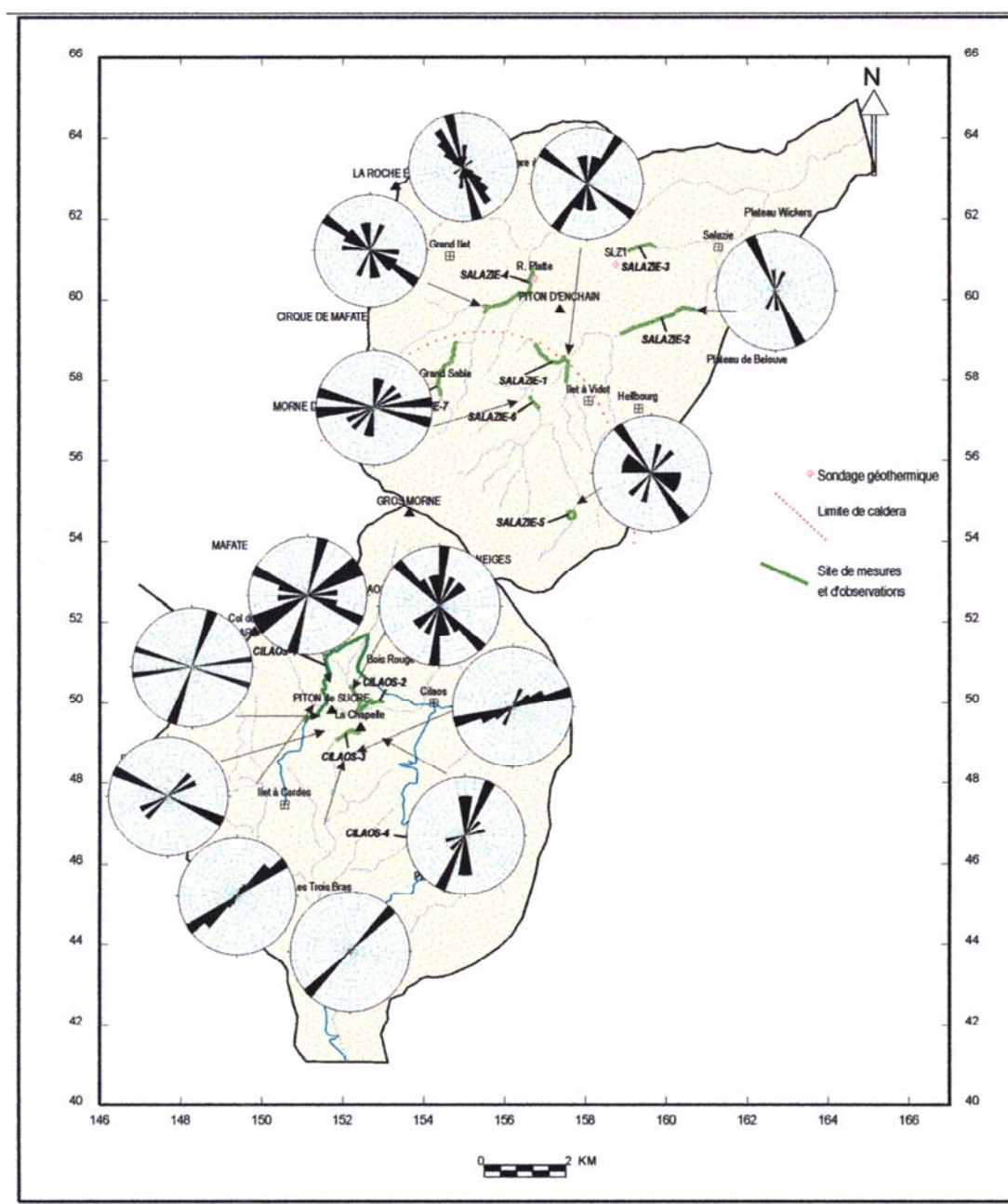


Fig. 29 - Carte des joints dans les cirques de Salazie et Cilaos.

d) Carte des failles

Ce type de structure tectonique est peu fréquente dans les cirques. Dans le cirque de Salazie, une seule faille a été observée dans la rivière du Mât. Il s'agit d'une faille normale montrant un rejet de 1,5 m orientée N27°E 48W et portant une ligne quasi verticale. Une seule faille décrochante N120E avait été vue sur le terrain par Rocher (1988). Son rejet n'est pas précisé mais elle est probablement de petite dimension.

Dans le cirque de Cilaos, une vingtaine de petites failles essentiellement décrochantes a été mesurée sur deux sites (fig. 30) uniquement localisés dans la partie sud du cirque (Cilaos 4) ou entre la lame intrusive de la Chapelle et les intrusions gabbroïques de la rivière du Bras Rouge (Cilaos 3). Les directions sont relativement stables autour d'un axe NNW-SSE (fig. 30). Maillot (1999) ne décrit pas de système de failles. En assimilant les failles observées à un système conjugué décrochant, on pourrait envisager une direction principale de compression N-S à NNW-SSE.

e) Carte des dépôts associés aux émergences

La répartition spatiale des dépôts, enduits et encroûtements observés au droit des émergences des cirques de Salazie et Cilaos montre (fig. 31) que les carbonates sont ubiquistes et que les argiles de type smectite sont bien représentées. La phase amorphe et les hydroxydes ou oxydes de fer avec leur couleur rouille caractéristique sont également très communs. Seul, l'échantillon prélevé en dehors d'une source en remplissage de fracture dans le cirque de Cilaos, présente une minéralogie spécifique caractérisée par la présence de prehnite. L'ensemble des minéralisations néoformées au droit des émergences avait déjà été mis en évidence par Rocher (1988). En revanche, nous n'avons pas mis en évidence de sulfates (jarosite, gypse). Les dépôts associés aux émergences thermales froides sub-actuelles de Salazie et Cilaos sont donc caractérisés par un assemblage à carbonates-smectite-oxydes de fer-amorphe.

2.6.3. Relation entre fracturation et hydrothermalisme

L'existence de dépôts fumerolliens sub-actuels a été mise en évidence par des études de terrain, en particulier dans la rivière du Mât dans le cirque de Salazie (Rançon et Rocher, 1985).

La répartition des sources thermo-minérales dans les cirques de Salazie et Cilaos est indiquée sur la figure 27. Comme cela a déjà été souligné lors de l'analyse des données de terrain, il n'y a pas de contrôle structural évident à l'échelle de l'affleurement de ces émergences. En revanche, on constate que la grande majorité des sources thermo-minérales est localisée à l'intérieur de la structure caldérique supposée (fig. 27) et en particulier à proximité des corps intrusifs.

Dans le cirque de Cilaos, de nombreuses émergences sont observées dans le lit de la rivière du Bras Rouge, en amont et en aval de la cascade du Bras Rouge. Les différentes émergences répertoriées sont situées dans l'intrusion, elle-même, à la faveur de joints ou de dykes tardifs (photo 1), ou dans l'encaissant immédiat des corps intrusifs. Il semble donc qu'il y ait un contrôle structural en grand des fluides hydrothermaux remontant vers la surface. La géométrie des corps intrusifs a été assimilée à celle d'une lame conique

(« cone-sheet ») plongeant vers le nord-est, c'est-à-dire vers le piton des Neiges. Il semble donc plausible de suggérer que ces fluides proviennent d'un réservoir superficiel hydrothermal situé à l'intérieur de la structure caldérique récente du piton des Neiges.

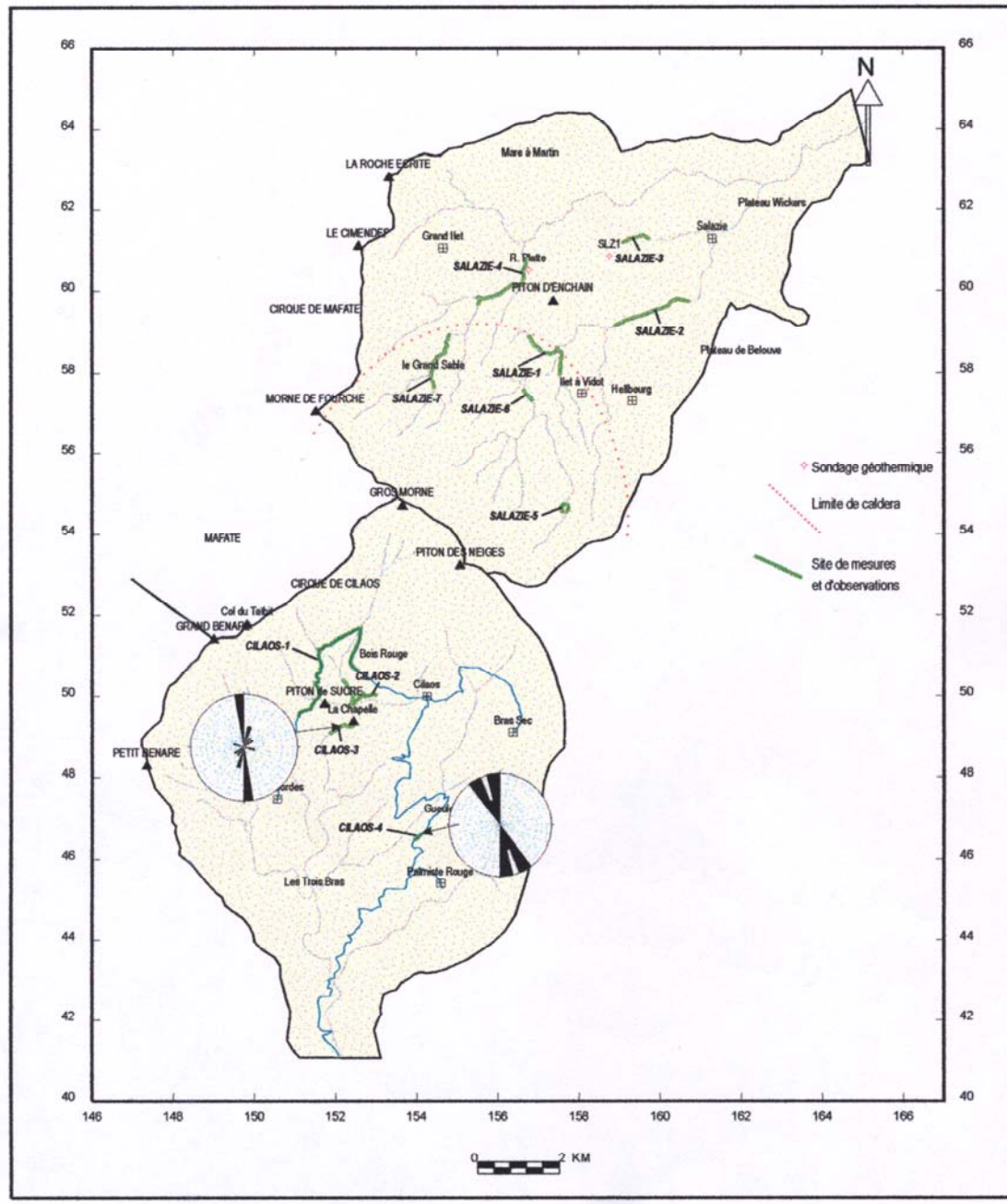


Fig. 30 - Carte des failles dans les cirques de Salazie et Cilaos.

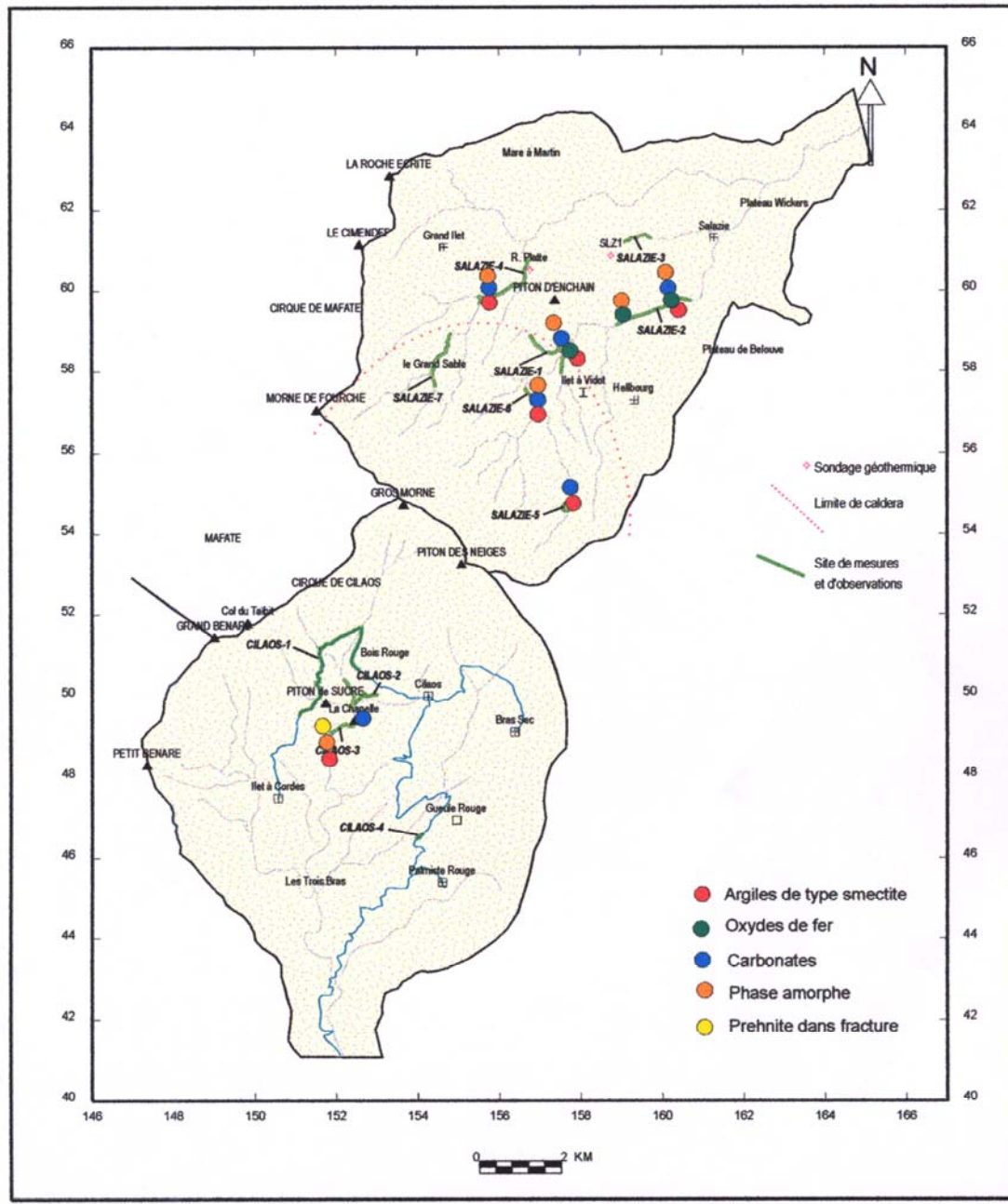


Fig. 31 - Carte des remplissages dans les cirques de Salazie et Cilaos.

Dans le cirque de Salazie, la plupart des émergences thermo-minérales sont implantées dans la rivière du Mât, au sein des formations du complexe intrusif ou à proximité. Les autres sources thermo-minérales connues (source Manouilh, sources situées en haut de Grand Sable) sont situées au pied du piton des Neiges. La géométrie en profondeur du complexe intrusif de la rivière du Mât est moins bien contrainte que celle du piton de Sucre et de la Chapelle. Mais on peut admettre que les corps intrusifs enracinés en profondeur représentent des discontinuités sub-verticales permettant l'ascension des fluides profonds. On a donc une convergence des observations faites de part et d'autre du piton des Neiges, qui mène à penser que les corps intrusifs de grande dimension, associés à la structure caldérique récente du piton des Neiges, représentent des drains privilégiés pour les circulations de fluides dans le substratum des cirques. Cette convergence suggère également que l'origine des fluides hydrothermaux se situe à l'intérieur (ou en bordure ?) de la structure caldérique.

2.7. INTERPRÉTATION

Les observations faites sur le terrain et leur analyse permettent de faire un point nouveau sur la connaissance du massif du piton des Neiges et notamment sur le problème de la fracturation au sein de ce massif volcanique et des conditions de perméabilité en profondeur, qui sont primordiales dans le développement d'un système hydrothermal.

2.7.1. Le rôle des différentes structures tectoniques et volcano-tectoniques

Les dykes et les sills sont omniprésents dans le massif et constituent parfois l'essentiel des formations visibles à l'affleurement. L'analyse de leur distribution ainsi que leur orientation n'apportent pas de renseignement prépondérant sur la connaissance du système hydrothermal actuel. En revanche, leur densité semble être un paramètre important à considérer. En effet, dans le secteur du Bras Rouge à Cilaos, la localisation des sources thermo-minérales et l'anomalie gaz maximale d'hélium mise en évidence lors de la campagne BRGM de juin 2001 (cf. partie concernant l'étude géochimique des gaz) se superposent à la zone à très forte densité d'intrusions (incluant dykes, sills et corps intrusifs de grande dimension) mise en évidence par Maillot (1999). De par leur bonne cohérence directionnelle, ces structures s'individualisent comme un réseau pénétratif fortement anisotrope qui affecte les formations anciennes du piton des Neiges.

Les structures tectoniques « franches » observées (failles, joints, fractures minéralisées) sont présentes en quantité très faible et ont une ampleur modérée. Cette conclusion rejoint celle des équipes précédentes ayant travaillé sur ce thème (Université de La Réunion, par exemple). À Cilaos, les failles décrochantes mesurées sur deux sites indiqueraient une phase de compression guidée par un paléo-tenseur sub-méridien. Cependant, il est difficile à partir de deux sites de généraliser cet épisode de déformation à l'échelle des cirques et donc d'établir une origine pour les failles. Cette faible intensité de la fracturation observable sur le terrain suggère donc qu'il n'y a pas

eu de phase tectonique notable ayant affecté le massif du piton des Neiges, tout au moins au cours de son histoire récente. L'autre conclusion importante qui en découle est que la fracturation tectonique ne semble pas être à même de jouer un rôle important dans la perméabilité du substratum des cirques.

En ce qui concerne les structures volcano-tectoniques, les cirques de Salazie et Cilaos possèdent des corps intrusifs de dimension hectométrique à kilométrique qui sont des structures importantes à l'échelle des cirques. Si l'on prend en compte leur position, on constate qu'ils sont plus ou moins centrés autour du piton des Neiges. C'est la raison pour laquelle les différents auteurs dont Rocher (1988) et Maillot (1999) s'accordent à les relier à un épisode caldérique récent consécutif à la mise en place de magma différenciés (syénites notamment).

La présence de ces corps intrusifs est importante à considérer dans la mesure où nos observations, appuyées par les conclusions des précédents travaux montrent qu'il y a une relation spatiale entre ces corps intrusifs et les sources thermo-minérales. Ceci suggère que ces corps intrusifs, de par leur enracinement supposé dans le substratum des cirques, constituent des discontinuités privilégiées drainant des fluides hydrothermaux vers la surface. Ils pourraient également être des zones privilégiées de circulations de fluides en profondeur. Des inconnues subsistent, cependant, sur l'étendue de cette perméabilité offerte par les corps intrusifs, perméabilité qui peut se situer au contact de l'encaissant et/ou en leur sein à la faveur d'une fissuration interne comme celle observée, en surface, au niveau de la Chapelle et de la cascade du Bras Rouge (réseau de joints systématiques). Sur le terrain, ces laves massives sont non altérées, affectées par des denses réseaux de joints systématiques non minéralisés et localement recoupées par des dykes de laves tardifs. L'absence de bréchification et d'altération hydrothermale significative dans ces intrusions et au contact avec l'encaissant semble indiquer des conditions de perméabilité réduites.

2.7.2. La recherche d'un modèle conceptuel de la circulation hydrothermale dans la partie centrale du massif du piton des Neiges

Comme cela a déjà été évoqué précédemment, la convergence des observations faites autour du piton des Neiges incite à rechercher un modèle général de circulation des fluides hydrothermaux dans les cirques pour rendre compte de l'association spatiale entre corps intrusifs de grande dimension et émergences thermo-minérales.

La figure 32 présente une section verticale NNE-SSW à travers les cirques de Salazie et Cilaos qui tente de rendre compte des observations et d'illustrer un système hydrothermal à l'origine des fluides rencontrés en surface. Les circulations de fluides seraient localisées au niveau des discontinuités offertes par les corps intrusifs de grande dimension situés majoritairement en bordure de la structure caldérique récente. L'origine de la recharge du système hydrothermal n'est pas contrainte par les données géologiques mais on peut envisager que les infiltrations d'eau froide de surface se font également à la faveur de ces discontinuités à l'intérieur des cirques mais aussi depuis le piton des neiges qui représente un relief important. En effet, les différences d'altitude

entre le sommet du piton des neiges et le fond des cirques sont de l'ordre de 2 500 m, ce qui favorise un gradient hydraulique et donc la recharge.

Les dernières manifestations volcaniques du piton des Neiges sont récentes et localisées dans le secteur du rond de Bras Rouge, Cilaos, à l'intérieur de la structure caldérique récente. Il est donc possible d'envisager l'existence de stocks magmatiques récents représentant des sources de chaleur potentielles à l'aplomb du piton des Neiges. Les conditions de température régnant en profondeur, peuvent être approchées à partir des informations fournies par le forage de Salazie SLZ1. En effet, l'isotherme 100° C se situerait vers -400 m NGF et l'isotherme 200° C vers -1800 m NGF, en considérant un régime thermique conductif (fig. 32).

Il est donc cohérent de proposer que les corps intrusifs sont suffisamment enracinés en profondeur pour drainer vers la surface des fluides hydrothermaux réchauffés en profondeur à l'intérieur de la structure caldérique.

Ce modèle ne permet malheureusement pas de préjuger des conditions de perméabilité. Dans le puits SLZ1 situé en dehors de la structure caldérique, la perméabilité est apparue très faible et ceci est corroboré par le profil thermique quasi-rectiligne qui marque une absence de convection. La perméabilité est apparemment plus élevée à l'intérieur et en bordure de la structure caldérique qu'à l'extérieur, mais il est difficile de conclure à ce stade qu'elle est suffisante pour le développement d'un réservoir géothermique.

2.8. CONCLUSIONS

Dans l'optique de reconnaître des structures potentiellement favorables à la géothermie, les compléments d'exploration réalisés dans les cirques de Salazie et de Cilaos ont permis d'identifier sur le terrain les principaux éléments géologiques suivants :

- des intrusions de type dyke ou sill ;
- des corps intrusifs de grande dimension ;
- des joints minéralisés ou secs affectant les océanites ou les intrusions ;
- des failles en nombre très limité, surtout décrochantes à Cilaos ;
- des évidences de paléo-perméabilités (dépôts hydrothermaux) et des sources ou suintements de surface caractérisés par des débits faibles à négligeables.

• Les intrusions et les corps intrusifs

Ce sont les structures les mieux représentées dans les cirques et se composent de dykes, sills et intrusions. Le pourcentage de dykes et de sills peut atteindre localement jusqu'à 50 % de la roche en place. Les dykes et les sills de puissance métrique sont organisés en réseau tandis que les intrusions différenciées, syénitiques à gabbroïques sont généralement sous la forme de lames intrusives d'épaisseur pluri-décamétrique. La direction des dykes à Salazie s'organise autour des familles N-S et WNW-ESE. A

Cilaos, leur direction est plus stable et s'organise autour des axes N-S et NNE-SSW. Les corps intrusifs de grande dimension décrivent des structures circulaires centrées autour de l'édifice du piton des Neiges et reliées à la structure caldérique récente proposée par Rocher (1988).

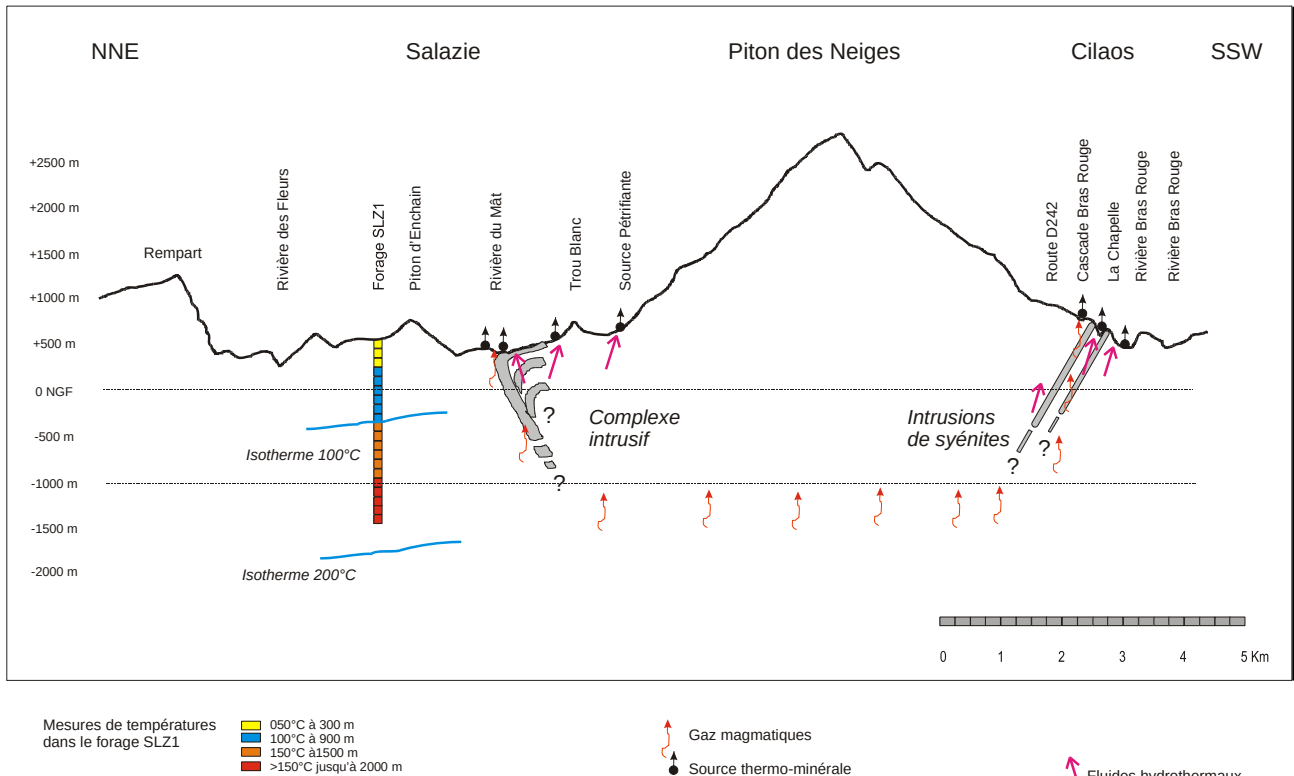


Fig. 32 - Section verticale interprétative à travers les cirques de Salazie et de Cilaos. Les corps intrusifs mis en place en bordure de la caldeira récente constitueraient les principales discontinuités pour la circulation des fluides en profondeur.

• Les joints et les failles

Les structures cassantes sont quantitativement très peu nombreuses. Ceci résulte en partie du fait que la déformation cassante (tectonique) s'exprime mal dans les formations de remaniement peu compétentes qui recouvrent la majeure partie du fond des cirques. Cependant, quelques failles ont été observées dans les deux cirques : une faille normale à Salazie et des failles décrochantes à Cilaos. On peut considérer en première interprétation sur les deux sites où elles ont été mesurées à Cilaos, que leur orientation est compatible schématiquement avec une compression sub-méridienne.

En ce qui concerne les joints, ils affectent principalement les formations du substratum, les dykes et les intrusions différenciées et basiques ainsi que les coulées récentes à Salazie. Ils sont organisés en couloir (Bras Rouge, la Chapelle) ou en réseau plus lâche

(piton de Sucre, radier des Fleurs Jaunes). La direction des joints à Salazie s'organise autour de plusieurs familles directionnelles avec une famille dominante WNW-ESE à NW-SE. À Cilaos, la direction des joints est NW-SE à ENE-WSW dans les intrusions récentes et plus variable dans les océanites anciennes.

Aucun accident structural majeur n'a été observé sur le terrain dans les zones intra-cirques. Il n'y a pas d'évidence de déformation cassante récente dans le cirque de Salazie. À Cilaos, les évidences de déformation cassante sont présentes tout en restant faibles et n'ont été observées que dans les formations d'océanites anciennes.

Les dépôts associés aux émergences thermales froides sub-actuelles de Salazie et Cilaos sont caractérisés par un assemblage à carbonates-smectite-oxydes de fer-amorphes. L'analyse des données de terrain montre qu'il n'y a pas de contrôle structural évident à l'échelle de l'affleurement de ces émergences. En revanche, on constate que la grande majorité des sources thermo-minérales est localisée à l'intérieur et en bordure de la structure caldérique supposée et en particulier à proximité des corps intrusifs.

L'analyse de la distribution des dykes ainsi que leur orientation n'apporte pas de renseignement prépondérant sur la connaissance du système hydrothermal actuel. En revanche, leur densité semble être un paramètre important à considérer. En effet, dans le secteur du Bras Rouge à Cilaos, la localisation des sources thermo-minérales et l'anomalie gaz maximale d'hélium mise en évidence dans cette étude se superpose à la zone à très forte densité d'intrusions.

En ce qui concerne le développement de la perméabilité, l'absence de fracturation tectonique importante dans l'histoire récente du massif du piton des Neiges est un critère défavorable. En revanche, la présence des corps intrusifs est importante à considérer dans la mesure où ils constituent des discontinuités enracinées dans le substratum des cirques qui drainent les fluides hydrothermaux vers la surface, expliquant ainsi le positionnement des sources à leur contact ou à proximité. Ces discontinuités constituent donc apparemment la principale origine de la perméabilité au sein du substratum des cirques, sans préjuger de son importance. La structure caldérique récente et, en particulier, ses bordures représenteraient donc la zone la plus favorable pour des travaux d'exploration ultérieurs.

3. Étude géochimique

3.1. EAUX DES SOURCES THERMALES DES CIRQUES DE SALAZIE ET DE CILAOS

En phase de prospection géothermique, l'étude de la géochimie des eaux thermales peut permettre de détecter des zones où se superposent, à la fois, une source de chaleur, et une structure favorable à l'existence d'un réservoir géothermique. Une étude intégrant les analyses chimiques et isotopiques des eaux thermales peut donner, entre autres, des indications sur :

- la température à laquelle ces eaux sont portées en profondeur dans le réservoir,
- la nature des roches constituant ce réservoir ainsi que sa profondeur,
- les interactions avec les milieux et les eaux superficielles qu'elles rencontrent,
- les processus qui peuvent avoir lieu pendant leur remontée et leur refroidissement (dépôts de minéraux, dissolution, dégagement de gaz),
- leurs aires de recharge, leurs temps de résidence, leurs modes et leurs vitesses de circulation en profondeur.

De nombreuses données géochimiques ayant été acquises dans le passé (Sanjuan *et al.*, 2000), les principaux objectifs recherchés dans cette étude ont été :

- l'analyse critique et la validation des données antérieures ;
- l'acquisition d'informations supplémentaires en réalisant de nouveaux types d'analyses (éléments traces particuliers, isotopes) ou en cherchant de nouvelles sources thermales, de telle manière à compléter les travaux antérieurs et à accroître la probabilité d'identifier un réservoir géothermique à partir d'investigations de surface. En outre, ces travaux devraient permettre de mieux définir et caractériser l'origine, la circulation et l'acquisition du chimisme des fluides du système hydrothermal déjà reconnu.

3.1.1. Campagne d'échantillonnage et de mesures sur site (du 17 au 27 octobre 2000)

a) Sources thermales échantillonnées

Comme l'indique l'étude de synthèse des données géologiques antérieures (Sanjuan *et al.*, 2000), l'essentiel des sources thermales de l'île de La Réunion est confiné dans les cirques du massif du piton des Neiges (principalement, Salazie et Cilaos). Face à une telle configuration, les travaux de cette étude ont été orientés sur les deux cirques en question. Une association quasi-constante avec la zone d'altération marquée par une

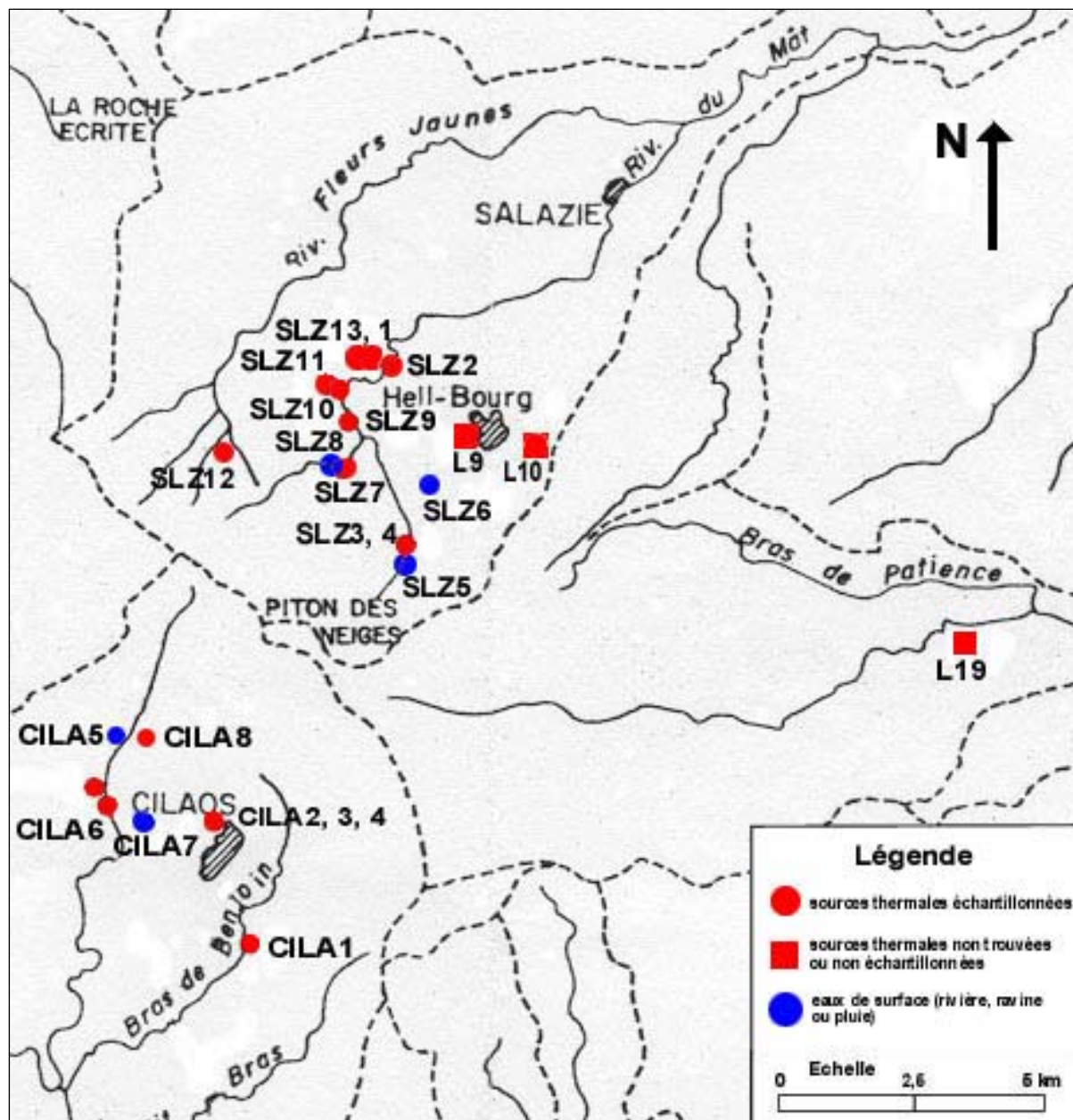


Fig. 33 - Carte de localisation des points d'eau (sources thermales + eaux de surface) prélevés au cours de la campagne d'octobre 2000 dans les cirques de Salazie et de Cilaos (île de La Réunion).

zéolitisation des basaltes de la zone ancienne est observée (Lopoukhine et Stieltjes, 1978).

L'eau de la source sulfureuse de la rivière des Galets, seule source thermique répertoriée dans le cirque de Mafate et décrite en 1978 comme une eau alcaline (pH de 9,42), de très faible débit (2 l/h), présentant une odeur très nette de H₂S mais une température de seulement 16°C (Lopoukhine et Stieltjes, 1978), n'a pas été échantillonnée. Son éloignement de la zone d'étude, son accessibilité relativement difficile et ses caractéristiques chimiques, qui ne reflètent pas l'existence de hautes températures en profondeur (Sanjuan *et al.*, 2000), nous ont menés à prendre cette décision.

Par contre, une tentative d'échantillonnage de la source du Bras Cabot, située dans le cirque des Marsouins, a été réalisée en raison des propriétés chimiques particulières de son eau et de la température obtenue au moyen des géothermomètres chimiques (autour de 130 °C ; Sanjuan *et al.*, 2000), qui se démarquent quelque peu de celles de la plupart des autres sources thermales. Cette tentative, néanmoins, a échoué à cause du mauvais état du sentier GR utilisé (passage interdit car échelles hors d'usage, dénivelé de 300 m). L'accès à cette source, qui ne peut se faire actuellement que par un seul sentier et qui demande 10 h de marche, a rendu l'échantillonnage de son eau impossible dans le cadre de cette mission.

Conformément au programme décrit dans le cahier des charges BRGM du projet Géothermie Réunion, seize sources constituant la majorité des sources thermales connues des cirques de Salazie et de Cilaos ont été échantillonnées entre le 17 et le 27 octobre 2000 (fig. 33). Des analyses sur des échantillons d'eau préalablement sélectionnés ont été réalisées pour la première fois. Il s'agit principalement d'analyses de certains éléments traces et de la majorité des analyses isotopiques.

La majorité des sources thermales échantillonnées au cours de cette étude a déjà été répertoriée par Lopoukhine et Stieltjes, en 1978, et possède un indice BSS (Banque de données du Sous-Sol). Des descriptions détaillées concernant ces sources (croquis de situation, environnement, paramètres physico-chimiques) sont reportées dans les travaux du BRGM (1966, 1968a, b), de Lopoukhine et Stieltjes (1978) et de Rocher (1988).

Les sources bien connues telles que Manouilh (SLZ4), ravine Bachelier (SLZ7), dans le cirque de Salazie, ou celles de l'établissement thermal (CILA2, CILA3 et CILA4) et du Bras Rouge (CILA1 et CILA6), dans le cirque de Cilaos, ont même fait l'objet de plusieurs analyses chimiques (BRGM, 1966 ; 1968a, b ; Lopoukhine et Stieltjes, 1978 ; BRGM, 1989 ; 1994 ; Iundt *et al.*, 1992 ; Iundt et Mauroux, 1992). Le positionnement des sources échantillonnées a été déterminé à l'aide d'un GPS et certaines ont été photographiées (photographies regroupées dans un CD-rom, remis au Conseil Régional de La Réunion).

Comme cela a déjà été évoqué dans l'étude géologique, toutes les sources se situent au bord de rivières (Mât, Bras Rouge, Bras Benjouin) ou de ravines (Olivette, Bachelier, Grand Sable, Fouquet, Pissa...). À l'exception des sources de l'établissement thermal de Cilaos dont les travaux de captage réalisés en 1970 ont permis de porter le débit à 23 m³/h au total, la majorité des sources se caractérise par :

- de faibles débits d'eau. Les débits les plus faibles, sous forme de suintement, ont été observés sur certaines des émergences, situées au pied de parois, subverticales qui longent le lit de la rivière du Mât ;
- des dépôts, à leur émergence, de couleur rouge ocre, constitués d'oxyhydroxydes de fer et/ou de dépôts blanchâtres de carbonates, comme cela a été confirmé par les analyses minéralogiques. Ces dépôts sont essentiellement causés par le dégagement de CO₂ de ces sources.

Cinq échantillons d'eaux de rivière (Mât), de ravine (Bachelier, Ferrière) et de pluie (dans les cirques de Salazie et de Cilaos) ont également été prélevés pour les analyses et serviront de base de comparaison pour les eaux des sources thermales. Seul un échantillon de gaz (gaz libre associé à la source Irénée de l'établissement thermal de Cilaos) a été collecté dans une ampoule en verre pour son analyse chimique. Soulignons que les dégagements de gaz associés à la plupart des sources thermales sont très diffus et donc, difficiles à prélever sans contamination par l'air.

Par rapport aux sources thermales échantillonnées pendant les campagnes précédentes, seules les sources Aval des anciens thermes d'Hell-Bourg, Aval du captage de la maison forestière d'Hell-Bourg et mare d'Affouches, qui appartiennent au cirque de Salazie, n'ont pas pu être retrouvées, malgré les recherches et les enquêtes menées. Comme la source Jacqueline n'est pas très bien définie dans l'article de Louvat *et al.* (1997), il est possible que cette source soit la même que celle d'Aval du sentier du Taïbit. Les sources Piment et ravine Ferrière ont disparu par suite d'un glissement de terrain tout comme avaient disparu les sources thermales, qui alimentaient les thermes de Hell-Bourg, après le passage d'un cyclone, en 1948. À Hell-Bourg, nous avons appris l'existence d'un dossier concernant des travaux de recherche sur ces sources. Malheureusement, nous n'avons pas pu rencontré l'ancien conseiller municipal, qui détient le dossier.

Les émergences des sources ravine Bachelier et aval du sentier du Taïbit ont été largement détériorées par la chute de gros blocs de pierre. En ce qui concerne une grande majorité des sources situées au pied des parois, qui longent la rivière du Mât, il est difficile de savoir si les émergences actuelles correspondent bien à celles décrites en 1978 en raison de leur nombre relativement élevé, de leurs faibles débits (suintements) et des glissements de terrain, qui ont pu avoir lieu. Par ailleurs, les résultats des analyses chimiques des eaux, s'ils ne sont pas foncièrement différents des précédents, présentent, quand même, des divergences. C'est pourquoi, nous avons préféré considérer ces émergences comme de nouveaux points. La même approche a été adoptée pour la source ravine Fouquet.

Contrairement à la campagne de 1978, la source de la ravine Grand Sable a été échantillonnée. L'eau de la source découverte par Rocher, en 1984, au bord de la ravine

Olivette, a également été prélevée. Les sources Irénée, Véronique et Dr Manès ont été échantillonnées à leur captage, situé à l'emplacement des anciens thermes, grâce à l'aimable collaboration de la directrice (M^{me} Rossolin) et des techniciens du nouvel établissement thermal. La source du Dr Manès fait l'objet d'un suivi du débit des gaz par l'Observatoire de l'IPGP.

De nouvelles sources ont été également recherchées. À l'exception des sources de la rivière du Mât et de la ravine Fouquet dont le cas particulier vient d'être évoqué, on peut considérer que, par rapport aux études précédentes, deux nouvelles sources ont été échantillonnées : une sur le lit de la ravine Olivette (SLZ1) et l'autre, près du pont des Salazes (CILA8). En ce qui concerne la source Manouilh, l'eau d'une deuxième émergence (SLZ3), dont les caractéristiques physico-chimiques sont différentes de celle de l'émergence principale, a également été prélevée. Des émergences de sources présentant des colorations rouge-ocre ont été observées dans la rivière du Bras Rouge (cirque de Cilaos), notamment près de la cascade du Bras Rouge ou du côté du pont situé dans le bassin des Salazes, mais n'ont pas pu être échantillonnées en raison de leur inaccessibilité (parois des gorges quasi à la verticale). Ces sources ne peuvent être approchées qu'en pratiquant du canyoning.

b) Mesures sur site et conditionnement des échantillons d'eau

Pour toutes les sources, les mesures physico-chimiques telles que la température, la conductivité, le pH, le potentiel d'oxydo-réduction (Eh), la concentration en oxygène dissous, l'alcalinité par la méthode de Gran, la recherche de H₂S dissous, au moyen d'une solution d'acétate de cadmium, ont été effectuées sur site. L'incertitude absolue sur les mesures de température et de pH est de 0,1°C et 0,05 unité pH, respectivement. Pour les autres paramètres, l'incertitude relative est de l'ordre de 5 %.

L'ensemble des données obtenues est reporté dans les tableaux 4 et 5. Les conditionnements réalisés pour les différents types d'analyses chimiques et isotopiques prévus sur chaque échantillon d'eau sont présentés dans l'annexe 4. Quelques mesures de température et de conductivité ont été effectuées sur les rivières et les ravines afin de suivre l'évolution de la température et de la minéralisation de leur eau et de détecter ainsi d'éventuels apports d'eaux plus chaudes et plus minéralisées tels que peuvent être ceux des eaux thermales (tabl. 4 et 5). À l'exception, peut-être, de la ravine Olivette (mesures de conductivité et de température plus élevées en aval, près de la rivière du Mât, qu'en amont), de tels apports n'ont pas pu être mis en évidence.

Les températures mesurées à l'émergence des sources thermales varient de 18,6 à 30,6 °C, dans le cirque de Salazie (tabl. 4), et de 18,4 à 37,8 °C, dans le cirque de Cilaos (tabl. 5). La température mesurée la plus élevée, celle de la source Irénée, est de 37,8 °C et reste stable par rapport aux données antérieures (ann. 5) tout comme les températures des deux autres sources de l'établissement thermal, Manès et Véronique, ainsi que de la source Manouilh.

Point de prélèvement	Echantillon	Indice BSS	Date	Coordonnées GPS	Altitude m	Débit l/mn	T °C	Cond à 25°C mS/cm	pH T _{émerg.}	Eh brut mV	O ₂ %	O ₂ mg/l	Alcalinité méq/l	Alcalinité mg/l HCO ₃	Remarques
Source Ravine Olivette, rive droite	SLZ 1	nouveau	18-oct	21° 03' 14" S 55° 29' 98" E	850		18,9	0,994	7,26	254	76	6,46	8,20	500	Couleur rouge ocre, précipitation Fe(OH) ₃ . L'eau se jette dans la ravine.
Souce Rivière du Mât	SLZ 2	nouveau	18-oct	21° 03' 15" S 55° 30' 12" E	820		18,0	1,58	7,87	285	72	6,78	17,70	1080	Travertin couleur rouge ocre.
Ravine Olivette amont			18-oct				16,0	0,350							
Ravine Olivette aval			18-oct				18,3	0,597							
Rivière du Mât			18-oct				16,3	0,370							Mesures réalisées près embouchure ravine Olivette.
Cascade qui se jette sur la rivière du Mât avec oxydation de fer			18-oct				18,2	0,140							Idem
Cascade qui se jette sur la rivière du Mât			18-oct				18,2	0,475							Idem
Source Manouilh, rive gauche	SLZ 3	1227-5X-0014	19-oct	21° 05' 15" S 55° 30' 20" E	1250	0,32	19,0	1,33	7,90	121	91	9,00	15,81	964	Suintements dans une cavité de la roche. Couleur rouge ocre. Photo 8.
Source Manouilh, rive gauche	SLZ 4	1227-5X-0014	19-oct	21° 05' 19" S 55° 30' 28" E	1250	8,60	30,6	1,58	6,59	12	14	1,08	19,21	1172	A gauche de la cavité. Couleur rouge ocre.
Rivière du Mât, en amont de la source Manouilh	SLZ 5	nouveau	19-oct	21° 05' 19" S 55° 30' 28" E	1250		12,4	0,156	8,57				1,59	97	Echantillon de référence.
Flaque d'eau de pluie, kiosque chemin Manouilh	SLZ 6	nouveau	19-oct		1300										Echantillon de référence, uniquement pour analyses D, ¹⁸ O.
Source pétillante ravine Bachelier, rive droite	SLZ 7	1226-5X-0028	21-oct	21° 04' 30" S 55° 29' 55" E	1100	0,97	19,4	1,54	7,42	183	93	8,30	18,7	1141	Précipitation carbonates + Fe(OH) ₃ . Eboulis sur la cavité.
Ravine Bachelier, en amont de la source pétillante	SLZ 8	nouveau	21-oct	21° 04' 30" S 55° 29' 55" E	1100		15,7	0,189	8,49	121			1,89	115	Echantillon de référence.
Ravine Goyave			21-oct	21° 03' 73" S 55° 29' 70" E			17,7	0,276							Couleur rouge ocre. Précipitation Fe(OH) ₃ et colloïdes.
Source rivière du Mât, rive droite	SLZ 9	nouveau	21-oct	21° 03' 73" S 55° 29' 70" E	900	très faible	26,1	1,38	7,39				15,55	949	A environ 100 m du GR R1. Couleur rouge ocre avec encroûtement de carbonates sur Fe(OH) ₃ .
Source rivière du Mât, rive gauche	SLZ 10	nouveau	21-oct	21° 05' 19" S 55° 30' 28" E	900		21,2	0,716	7,05	111			8,16	498	Précipitation de carbonates uniquement.
Source Ravine Fouquet	SLZ 11	nouveau	21-oct		950		19,2	1,00	7,39	108			11,29	689	Mare dans ravine sèche.
Ravine Lebeau			21-oct				17,6	0,291							Mesures réalisées au niveau du sentier.
Rivière du Mât			21-oct				18,1	0,304							Mesures réalisées au niveau du GR R1.
Source Ravine Grand Sable, rive droite	SLZ 12	1226-5X-0027	22-oct	21° 03' 94" S 55° 28' 45" E	1265	> 6	18,6	1,20	6,57	123	36	3,40	8,41	513	Faïlle N-S. Eboulis de roches de nature différente près de la source. Source cachée par arbres, qui se jette sur la ravine. Précipitation de carbonates.
Ravine Grand Sable, en amont de la source thermique			22-oct	21° 03' 94" S 55° 28' 45" E			16,8	0,255							
Source Ravine Olivette, rive droite	SLZ 13	thèse Rocher (1988)	26-oct	21° 03' 12" S 55° 29' 91" E	800	4,8	26,0	4,98	6,05	21	7	0,58	42,67	2603	Source rive droite, sous les pins. Précipitation de Fe(OH) ₃ .

Tabl. 4 - Prélèvements d'échantillons d'eau et mesures physico-chimiques réalisés sur site au cours de la campagne d'échantillonnage effectuée en octobre 2000 dans le cirque de Salazie (Ile de La Réunion).

Point de prélèvement	Echantillon		Date	Coordonnées GPS	Altitude m	Débit l/mn	T °C	Cond à 25°C mS/cm	pH T _{émerg.}	Eh brut mV	O ₂ %	O ₂ mg/l	Alcalinité méq/l	Alcalinité mg/l HCO ₃	Remarques
Source rivière Bras de Benjoun, rive gauche	CILA 1	1228-4X-0057	24-oct	21° 08' 97" S 55° 28' 63" E	920	0,193	22,6	1,61	6,66	-27	64	5,30	15,43	941	Source située près du pont. Précipitation de Fe(OH) ₃ + carbonates.
Rivière Bras de Benjoun, en amont de la source			24-oct				18,6	0,265							
Source Dr Manès, captage anciens thermes	CILA 2	1226-8X-0065	24-oct	21° 07' 83" S 55° 28' 22" E	1130	8,5	31,0	2,26	5,33	12	5	0,39	26,65	1626	Suivi Observatoire IPGP, Université Réunion ou CNRS ?
Source Irenée, captage anciens thermes	CILA 3	1226-8X-0039	24-oct	21° 07' 83" S 55° 28' 22" E	1130	120	37,8	2,37	5,98	-26	6	0,46	31,20	1903	Echantillonnage gaz libre dans l'abri en verre de la source.
Source Véronique, captage anciens thermes	CILA 4	1226-8X-0064	24-oct	21° 07' 83" S 55° 28' 22" E	1130	220	30,3	2,01	5,36	6	5	0,31	23,52	1435	
Flaque eau de pluie	CILA 5	nouveau	24-oct		1170										Echantillon de référence, uniquement pour analyses D - ¹⁸ O.
Source Aval Sentier Taibit, rive droite de la rivière Bras Rouge, (Jacqueline ?)	CILA 6	1226-8X-0040	25-oct	21° 07' 55" S 55° 27' 15" E	1000	47	36,3	1,43	6,32	13	54	4,30	11,59	707	Quelques émergences ayant des colorations rouge ocre en amont et en aval, près de la source.
Ravine Ferrière	CILA 7	nouveau	25-oct		1000		23,0	0,303	7,72	119	100	8,10	3,10	189	Echantillon de référence.
Source ravine Pissa, près du pont des Salazes, rive gauche	CILA 8	nouveau	26-oct	21° 06' 94" S 55° 27' 43" E	1180	2,4	18,4	1,19	6,66	42	13	1,21	11,56	705	Précipitation Fe(OH) ₃ .

Tabl. 5 - Prélèvements d'échantillons d'eau et mesures physico-chimiques réalisés sur site au cours de la campagne d'échantillonnage effectuée en octobre 2000 dans le cirque de Cilaos (île de La Réunion).

Par rapport aux mesures sur site obtenues dans le passé (ann. 5), il apparaît que les écarts de température les plus marqués entre les différentes campagnes sont observés sur :

- la source ravine Olivette SLZ13 (26 °C en 2000 contre 35,5 °C en 1984) ;
- la source ravine Bachelier (19,4 °C en 2000 contre 28,2 °C en 1970 et 25,6 °C en 1978) ;
- la source Aval du sentier Taïbit (36,3 °C en 2000 contre 42 °C en 1978 et, peut-être, 48 °C en 1994, si cette source est également la source Jacqueline).

Pour la source ravine Olivette, cette baisse de température s'accompagne d'une diminution de la salinité de l'eau relativement importante (ann. 5). Par conséquent, un processus de mélange avec une eau superficielle froide est probablement la cause de ce refroidissement. Pour les deux autres sources, la salinité et la composition chimique de l'eau restent semblables (ann. 5). Deux causes de cette baisse de température peuvent être envisagées :

- les chutes de gros blocs de pierre, qui ont affecté les émergences,
- une remontée plus lente du fluide.

En général, les autres paramètres confirment les données antérieures : eaux carbo-gazeuses, moyennement minéralisées, qui peuvent indiquer des valeurs d'alcalinité assez fortes et des valeurs de pH allant de 5,33 à 7,90.

On peut constater que les valeurs de pH des eaux thermales du cirque de Cilaos (5,33-6,66) sont généralement plus basses que celles du cirque de Salazie (6,05-7,90) où les eaux des sources de la rivière du Mât, à l'exception de celle de la source Manouilh (SLZ4), ont toutes des valeurs de pH > 7. Pour les sources de l'établissement thermal de Cilaos, les valeurs de pH les plus basses de toutes les mesures effectuées sur l'eau de ces sources ont été trouvées au cours de cette étude (ann. 5).

La source ravine Olivette découverte par Rocher (1984) présente toujours la minéralisation la plus élevée et le pH de son eau a enfin été déterminé. Les sources de Manouilh et certaines sources de la rivière du Mât possèdent des minéralisations et des concentrations en bicarbonate plus faibles en 2000 que celles mesurées dans les études antérieures tandis que les températures, à leur émergence, restent semblables.

Les valeurs du potentiel d'oxydo-réduction sont des données brutes et n'ont pas été corrigées du potentiel d'électrode (tabl. 4 et 5). En effet, ce paramètre est reporté à titre indicatif et ne sera pas utilisé pour les calculs de saturation des eaux vis-à-vis des minéraux car l'équilibre Rédox n'est pas atteint dans les eaux naturelles. Il en résulte que la notion même de Eh n'a pas de sens dans ces solutions (Michard, 1989). Le plus souvent, les potentiels mesurés dans ces eaux sont des potentiels mixtes causés par la présence de plusieurs couples Rédox et cela n'implique pas que les différents couples Rédox présents soient en équilibre entre eux.

À partir des mesures, on peut noter que les eaux des sources thermales Manouilh (SLZ4) et ravine Olivette (SLZ13) ainsi que celles de Cilaos indiquent un caractère plus réducteur ($Eh < 0$ ou proches de zéro) que celui des autres eaux ($Eh > 0$), qui appartiennent plutôt à un milieu relativement bien oxygéné. En général, ces valeurs suivent bien la tendance des concentrations en oxygène dissous (tabl. 4 et 5).

La présence de sulfures (utilisation d'acétate de cadmium) n'a été détectée dans aucune source.

3.1.2. Analyses chimiques et isotopiques des échantillons

À l'exception des analyses isotopiques en carbone-13 et en carbone-14, qui ont été effectuées dans un laboratoire des Etats-Unis (BETA ANALYTIC, Floride), toutes les analyses chimiques, isotopiques et gazeuses ont été réalisées dans les laboratoires du BRGM, à Orléans.

a) Analyses chimiques des eaux

Les analyses des espèces majeures et de la plupart des éléments traces et infra-traces ont été réalisées sur toutes les eaux thermales échantillonnées, une eau de rivière (Mât) et deux eaux de ravine (Bachelier, Ferrière). Quelques éléments traces et infra-traces tels que Br, Cs, Rb, Ge et U ont été analysés sur seulement dix échantillons sélectionnés, dont une eau de ravine (Bachelier).

Les techniques d'analyse utilisées sont toutes des méthodes classiques en analyse des eaux (plasma à couplage inductif + spectrométrie de masse : ICP-MS, spectrophotométrie par absorption atomique, chromatographie ionique, colorimétrie, titration, électrode spécifique).

Les cations majeurs K, Ca, Mg ainsi que les éléments traces Sr, Ba, Mn, Li, B, As, Fe, Al, Rb, Cs, Ge, U, Cu, Co, Ni, Zn, Cr, Pb, Cd et Ag ont été analysés par ICP-MS. L'ion Na a été déterminé par absorption atomique en flamme.

Les anions majeurs Cl, SO₄, NO₃, NO₂, PO₄ et l'anion trace Br ont été analysés par chromatographie ionique. L'ion F a été analysé au moyen d'une électrode spécifique.

La silice dissoute a été déterminée par colorimétrie (heptamolybdate).

Suivant la valeur des concentrations des espèces en solution, les incertitudes analytiques relatives varient de 2 à 5 % pour les espèces majeures et de 10 à 15 % pour les éléments traces et infra-traces. En ce qui concerne l'analyse de la silice dissoute, l'incertitude est de 2 %.

Les résultats analytiques obtenus sont reportés dans les tableaux 6 et 7. Les valeurs de la balance ionique (B.I.) toutes inférieures à 5 % suggère une bonne qualité des analyses des espèces majeures.

Source	n° échantillon	T	pH	Na	K	Ca	Mg	Cl	Alc _{tot}	SO ₄	NO ₃	SiO ₂	Na/Cl	Cl/Br	Cl/B	Ca/Mg	TDS _{calc}	S+	S-	B.I.
		°C		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l HCO ₃	mg/l	mg/l	mg/l	masse	masse	masse	masse	mg/l	még/l	még/l	%
Source Ravine Olivette, rive droite	SLZ1	18,9	7,26	130	4,3	55,5	31,2	47,9	500	49,2	< 0,1	43	3		29	1,8	892	11,10	10,57	4,88
Source Rivière du Mât	SLZ2	18,0	7,87	84,1	11,9	78,0	145	5,1	1080	48,0	< 0,1	75	16		65	0,5	1561	19,79	18,85	4,86
Source Manouilh, rive gauche	SLZ3	19,0	7,90	62,0	4,3	160	73,8	1,6	964	10,0	< 0,1	96	39		32	2,2	1395	16,86	16,06	4,90
Source Manouilh, rive gauche	SLZ4	30,6	6,59	115	8,8	165	83,6	2,8	1172	12,7	< 0,1	120	41	122	33	2,0	1720	20,34	19,56	3,93
Rivière du Mât, amont source Manouilh	SLZ5	12,4	8,57	13,3	3,1	11,2	6,2	0,7	97	2,2	< 0,1	29	19		> 35	1,8	173	1,73	1,66	4,21
Source pétrofiant ravine Bachelier, rive droite	SLZ7	19,4	7,42	127	6,1	144	85,3	3,3	1141	18,8	< 0,1	92	38	165	57	1,7	1645	19,88	19,19	3,56
Ravine Bachelier, amont source pétrofiant	SLZ8	15,7	8,49	13,0	2,0	16,5	8,3	1,4	115	4,8	< 0,1	23	9	200	> 70	2,0	195	2,12	2,02	4,74
Source rivière du Mât, rive droite	SLZ9	26,1	7,39	220	7,6	140	68,0	9,9	949	265	0,2	115	22		130	2,1	1792	22,35	21,35	4,54
Source rivière du Mât, rive gauche	SLZ10	21,2	7,05	43,8	2,9	76,3	34,5	2,1	498	7,9	< 0,1	31	21		> 105	2,2	705	8,63	8,39	2,80
Source Ravine Fouquet	SLZ11	19,2	7,39	50,7	1,8	115	54,8	1,6	689	27,3	< 0,1	40	32		> 80	2,1	988	12,50	11,91	4,84
Source Ravine Grand Sable, rive droite	SLZ12	18,6	6,57	29,9	3,6	185	52,7	1,8	513	278	< 0,1	43	17	164	82	3,5	1118	14,96	14,25	4,88
Source Ravine Olivette, rive droite	SLZ13	26,0	6,05	1080	21,5	165	111	456	2603	303	< 0,1	48	2	585	35	1,5	4849	64,89	61,84	4,82
Source rivière Bras de Benjouin, rive gauche	CILA1	22,6	6,66	127	2,8	170	82,2	12,2	941	204	< 0,1	113	10	381	106	2,1	1666	20,84	20,02	4,04
Source Dr Manès, captage anciens thermes	CILA2	31,0	5,33	296	6,5	160	99,3	2,6	1626	81,1	0,3	128	114	186	26	1,6	2412	29,20	28,42	2,70
Source Irénée, captage anciens thermes	CILA3	37,8	5,98	369	8,1	185	111	3,2	1903	105	< 0,1	155	115	152	26	1,7	2855	34,62	33,47	3,38
Source Véronique, captage anciens thermes	CILA4	30,3	5,36	250	5,7	143	90,5	2,5	1435	66,2	< 0,1	118	100	179	29	1,6	2122	25,60	24,97	2,49
Source Aval Sentier Talbit, Bras Rouge	CILA6	36,3	6,32	249	9,8	62,3	31,9	23,0	707	199	< 0,1	125	11	676	15	2,0	1596	16,82	16,38	2,61
Ravine Ferrière	CILA7	23,0	7,72	17,3	0,4	29,0	13,9	1,1	189	4,4	< 0,1	21	16		> 55	2,1	284	3,35	3,22	4,04
Source ravine Pissa, près pont Salazes, rive	CILA8	18,4	6,66	71,6	1,5	178	34,3	1,7	705	124	< 0,1	77	42		23	5,2	1203	14,86	14,19	4,62

Tabl. 6 - Résultats des analyses chimiques des eaux prélevées au cours de la campagne d'échantillonnage des sources thermales des cirques de Salazie et de Cilaos, réalisée en octobre 2000.

Echantillon	F	NH ₄	NO ₂	PO ₄	Br	Sr	Fe	B	Li	Ba	Mn	Al	Cs	Rb	Ge	As	U	Cu	Co	Ni	Zn	Cr	Pb	Cd	Ag
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
SLZ1	0,3	< 0,1	< 0,01	< 0,1		0,23	0,03	1649	22	< 5	27	< 30				< 10		< 2	< 2	< 5	< 5	< 5	< 2	< 2	< 5
SLZ2	0,1	< 0,1	< 0,01	< 0,1		0,53	0,02	79	26	8	23	< 30				< 10		< 2	< 2	< 5	< 5	< 5	< 2	< 2	< 5
SLZ3	< 0,1	< 0,1	< 0,01	< 0,1		0,89	0,10	50	15	8	486	40				< 10		< 2	2	24	< 5	< 5	< 2	< 2	< 5
SLZ4	0,2	< 0,1	< 0,02	< 0,1	0,023	0,80	3,2	85	33	25	720	< 30	< 1	26	< 1	< 10	0,2	< 2	2	29	< 5	5	< 2	< 2	< 5
SLZ5	0,1	< 0,1	< 0,01	< 0,1		0,04	0,03	< 20	2	< 5	< 5	30				< 10		< 2	< 2	< 5	< 5	< 5	< 2	< 2	< 5
SLZ7	< 0,1	< 0,1	< 0,01	< 0,1	0,020	0,91	< 0,02	58	20	< 5	< 5	< 30	< 1	23	< 1	< 10	< 0,1	< 2	< 2	7	< 5	< 5	< 2	< 2	< 5
SLZ8	0,1	< 0,1	< 0,01	< 0,1	0,007	0,07	< 0,02	< 20	2	< 5	< 5	< 30	< 1	5	< 1	< 10	< 0,1	< 2	< 2	< 5	< 5	< 5	< 2	< 2	< 5
SLZ9	0,2	1,9	0,01	< 0,1		0,72	0,45	76	10	12	162	30				< 10		3	3	13	< 5	< 5	< 2	< 2	< 5
SLZ10	< 0,1	< 0,1	< 0,01	< 0,1		0,57	< 0,02	< 20	1	< 5	14	< 30				< 10		< 2	< 2	6	< 5	< 5	< 2	< 2	< 5
SLZ11	< 0,1	< 0,1	< 0,01	< 0,1		0,64	< 0,02	< 20	< 1	< 5	< 5	< 30				< 10		< 2	< 2	< 5	< 5	< 5	< 2	< 2	< 5
SLZ12	0,2	< 0,1	< 0,01	< 0,1	0,011	0,98	< 0,02	22	4	< 5	< 5	< 30	< 1	14	< 1	< 10	0,2	< 2	< 2	11	< 5	< 5	< 2	< 2	< 5
SLZ13	0,7	< 0,1	< 0,05	< 0,1	0,780	1,74	0,42	12887	41	8	313	80	< 1	70	< 1	< 10	2,7	< 2	< 2	10	< 5	32	< 2	< 2	< 5
CILA1	0,1	< 0,1	< 0,02	< 0,1	0,032	0,48	2,71	115	7	< 5	363	< 30	< 1	5	< 1	< 10	< 0,1	< 2	3	44	< 5	< 5	< 2	< 2	< 5
CILA2	< 0,1	< 0,1	< 0,05	< 0,1	0,014	1,37	7,47	101	7	< 5	495	< 30	< 1	40	< 1	< 10	< 0,1	< 2	4	60	< 5	9	< 2	< 2	< 5
CILA3	< 0,1	< 0,1	< 0,05	< 0,1	0,021	1,63	8,82	125	10	5	446	< 30	< 1	51	< 1	< 10	< 0,1	< 2	4	62	< 5	10	< 2	< 2	< 5
CILA4	< 0,1	< 0,1	< 0,05	< 0,1	0,014	1,24	6,35	85	6	< 5	394	< 30	< 1	46	< 1	< 10	< 0,1	< 2	3	56	8	8	< 2	< 2	< 5
CILA6	2,7	< 0,1	< 0,01	< 0,1	0,034	0,44	0,23	1501	178	33	148	< 30	4	80	4	< 10	< 0,1	< 2	< 2	< 5	< 5	< 5	< 2	< 2	< 5
CILA7	< 0,1	< 0,1	< 0,01	< 0,1		0,21	< 0,02	< 20	< 1	< 5	< 5	< 30				< 10		< 2	< 2	< 5	< 5	< 5	< 2	< 2	< 5
CILA8	< 0,1	< 0,1	< 0,01	< 0,1		2,49	2,31	73	3	< 5	487	< 30				< 10		< 2	< 2	17	< 5	< 5	< 2	< 2	< 5

Tabl. 7 - Résultats des analyses chimiques des eaux prélevées au cours de la campagne d'échantillonnage des sources thermales des cirques de Salazie et de Cilaos, réalisée en octobre 2000 (fin).

b) Analyses isotopiques des eaux

Les analyses isotopiques en deutérium et en oxygène-18 ont été effectuées sur toutes les eaux thermales échantillonnées, une eau de rivière (Mât), deux eaux de ravine (Bachelier et Ferrière) et les deux eaux de pluie. Les activités en tritium ont été analysées sur 12 échantillons d'eau sélectionnés, dont les deux eaux de ravine. Les teneurs en soufre-34 et oxygène-18 des sulfates dissous, les teneurs en carbone-13 du carbone dissous, l'activité du carbone-14 ainsi que les rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ont été déterminés sur dix échantillons sélectionnés, dont les deux eaux de ravine.

Toutes ces analyses isotopiques ont été réalisées par spectrométrie de masse.

Les incertitudes absolues sur les mesures des teneurs en deutérium, oxygène-18 et tritium sont, respectivement, de 0,8 ‰, 0,1 ‰ et 1 UT. Sur les analyses des rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, des teneurs en soufre-34 et oxygène-18 des sulfates dissous ainsi que des teneurs en carbone-13 du carbone dissous, elles sont, respectivement, de 0,00001, 0,3 ‰, 0,3 ‰ et 0,1 ‰. L'incertitude relative sur la détermination de l'activité en carbone-14 est autour de 1 à 2 %.

Les résultats analytiques obtenus sont reportés dans le tableau 8.

c) Analyses chimiques de gaz

Les gaz libres suivants : CO_2 , N_2 , O_2 , He, H_2 , H_2S , Ar, CH_4 , éthane, propane, butane et pentane ont été analysés par chromatographie en phase gazeuse sur le seul échantillon de gaz collecté : celui associé à la source thermique Irénée.

L'incertitude relative sur les mesures est de 3 %, excepté pour les gaz He, H_2 , H_2S où elle est de 5 %.

Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 9.

3.1.3. Interprétation des résultats et discussion

a) Chimisme des eaux et évolution dans le temps

Les résultats des analyses chimiques obtenus confirment, la plupart du temps, les données acquises au cours des études précédentes. Etant donné les valeurs de pH et les concentrations des autres espèces, on peut considérer que la concentration en bicarbonate représente l'essentiel de l'alcalinité.

A l'exception de l'eau de la source ravine Olivette (SLZ13), qui est la plus minéralisée ($\approx 5 \text{ g/l}$) et montre un chimisme particulier (faciès bicarbonaté chloruro-sodique), toutes les autres eaux thermales ont une minéralisation moyennement élevée (de 1 à 3 g/l) et sont caractérisées par un faciès à dominante bicarbonaté sodique ou calco-sodique (tabl. 6), qui résulte du contact de ces eaux avec des dégagements de CO_2 d'origine profonde et les basaltes.

Nom du prélèvement	n° échantillon	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	δD ‰	^3H UT	$\delta^{34}\text{S} (\text{SO}_4)$ ‰	$\delta^{18}\text{O} (\text{SO}_4)$ ‰	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	^{14}C %	Age ^{14}C ans	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Source ravine Olivette, rive droite	SLZ1	-6,5	-40,1	n.d.	3,0	3,1	-4,5	40,2	7310	
Source rivière du Mât	SLZ2	-5,9	-36,5	n.d.						
Source Manouilh, rive gauche	SLZ3	-7,0	-39,8	n.d.						
Source Manouilh, rive gauche	SLZ4	-7,6	-43,9	< 1	5,6	4,1	3,0	4,0	25780	0,704282
Rivière du Mât, amont source Manouilh	SLZ5	-8,1	-49,0	n.d.						
Flaque eau de pluie, kiosque chemin Manouilh	SLZ6	-2,4	4,5	n.d.						
Source pétrolière ravine Bachelier, rive droite	SLZ7	-6,7	-37,2	< 1	2,0	2,5	-1,1	10,6	18010	0,704300
Ravine Bachelier, amont source pétrolière	SLZ8	-5,6	-28,6	2	n.d.	2,6	-2,8	78,4	1950	0,704282
Source rivière du Mât, rive gauche	SLZ10	-6,2	-35,5	n.d.						
Source ravine Fouquet	SLZ11	-6,5	-37,9	n.d.						
Source ravine Grand Sable, rive droite	SLZ12	-4,9	-23,5	< 1	3,6	1,8	-1,4	22,9	11840	0,704336
Source ravine Olivette, rive droite	SLZ13	-7,8	-45,9	< 1	8,9	5,3	1,8	5,4	23440	0,704270
Source rivière Bras de Benjouin, rive gauche	CILA1	-8,2	-54,3	< 1	3,0	4,7	2,7	5,8	22940	0,704142
Source Dr Manès, captage anciens	CILA2	-8,2	-51,3	< 1			3,2	3,2	27680	
Source Irenée, captage anciens	CILA3	-8,2	-51,2	< 1	5,3	4,5				0,704169
Source Véronique, captage anciens thermes	CILA4	-8,1	-51,2	< 1	5,8	4,4				
Flaque eau de pluie	CILA5	-3,2	-11,8	n.d.						
Source Aval Sentier Taïbit, Bras Rouge	CILA6	-8,2	-50,5	< 1	4,8	3,1	2,2	8,7	19590	0,704162
ravine Ferrière	CILA7	-6,4	-40,7	< 1			-7,3	100,5	moderne	0,704256
Source ravine Pissa, près pont Salazes, rive gauche	CILA8	-6,7	-41,4	< 1						

n.d. : non déterminé car quantité de précipité insuffisante.

Tabl. 8 - Résultats des analyses isotopiques des eaux prélevées au cours de la campagne d'échantillonnage des sources thermales des cirques de Salazie et de Cilaos, réalisée en octobre 2000 (fin).

Echantillon	Unité	Source Irénée	Incertitude
Date de prélèvement		24/10/00	
CO₂	% vol.	90,2	3%
O₂	% vol.	1,56	3%
N₂	% vol.	5,67	3%
Ar	% vol.	0,08	3%
He	% vol.	< 0,005	5%
H₂	% vol.	< 0,005	5%
H₂S	% vol.	< 0,005	3%
CH₄	% vol.	0,001	3%
C₂H₆	% vol.	< 0,0002	3%
C₃H₈	% vol.	0,005	3%
iso-C₄H₁₀	% vol.	0,010	3%
n-C₄H₁₀	% vol.	0,007	3%
ΣC₄H₁₀	% vol.	0,017	3%
ΣC₅H₁₂	% vol.	0,007	3%
ΣC₆H₁₄	% vol.	0,006	3%

Géothermomètres gaz		T
T (CO₂/H₂S/H₂/CH₄)	°C	< 111
T (CO₂/H₂/CH₄)	°C	< 221
T (H₂/Ar)	°C	< 91
N₂/Ar		71
He/Ar		0,063

T (CO₂/H₂S/H₂/CH₄) : température estimée à partir du géothermomètre de D'Amore and Panichi (1980) en fixant P_{CO2} = 1 atm.

T (CO₂/H₂/CH₄) : température estimée à partir du géothermomètre de Marini (1987) en fixant P_{CO2} = 1 atm.

T (H₂/Ar) : température estimée à partir du géothermomètre de Giggenbach and Goguet (1989).

Les rapports volumiques N₂/Ar et He/Ar atmosphériques sont respectivement 84 et 5,7 10⁻⁴.

Un rapport volumique He/Ar de 0,1 est généralement caractéristique d'une origine magmatique.

Tabl. 9 - Résultats de l'analyse chimique des gaz prélevés sur la source thermique Irénée (cirque de Cilaos) en octobre 2000.

Dans l'ensemble, les caractéristiques chimiques des eaux thermales du massif du piton des Neiges sont très différentes de celles des eaux de rivière ou de ravine (tabl. 6 et 7) et de celles observées par Schoeller (1962) pour des eaux souterraines circulant dans les basaltes (teneur en silice dissoute : 20-30 mg/l ; teneurs en Ca, Mg et Na < 120, 50 et 50 mg/l, respectivement ; teneurs en SO₄ et Cl faibles ; TDS < 0,4 g/l ; rapport Mg/Ca proche de 1 et rapport Ca/Na voisin de celui de la roche encaissante).

La figure 34, qui est un diagramme ternaire proposé par Giggenbach (1991), construit en utilisant les concentrations en bicarbonates, chlorures et sulfates, non seulement illustre le fait que ces eaux soient essentiellement bicarbonatées mais indique également qu'elles font partie du groupe d'eaux thermales classées comme des eaux périphériques, en bordure d'un gisement géothermal. Pour ce type d'eaux qui possèdent des températures basses à moyennement élevées et qui ont tendance à être assez réactives au cours de leur remontée, les géothermomètres chimiques doivent être appliqués avec beaucoup de précaution (la zone où ces géothermomètres peuvent être utilisés sans trop de problèmes est représenté en hachuré dans le diagramme). La présence d'un gisement de vapeur naturelle n'étant pas mise en évidence, ce qui est en bon accord avec les faibles concentrations en ammonium déterminées dans les eaux thermales, les concentrations en sulfates, qui sont parfois élevées, proviendraient plutôt de processus d'interaction avec la roche que d'émanations de H₂S, associées à la vapeur.

Les valeurs des rapports Cl/Br (122-186 ; concentrations exprimées en mg/l) sont semblables pour les eaux de la plupart des sources pour lesquelles le bromure a été analysé (fig. 35). Elles sont également proches du rapport déterminé sur l'eau froide de la ravine Bachelier (200). Par contre, elles sont différentes de celui de l'eau de mer (296) et indiquent un enrichissement en bromure des eaux par rapport au chlorure. La similarité des rapports Cl/Br suggère une origine commune de ces deux éléments. Néanmoins, comme pour de nombreuses eaux minérales ou thermales, il est difficile de déterminer l'origine de ces éléments.

Trois exceptions à la tendance observée sur le diagramme Cl-Br sont constatées (fig. 35) : les eaux des sources Benjouin, ravine Olivette (SLZ13) et Aval du sentier de Taïbit, qui indiquent des valeurs Cl/Br beaucoup plus élevées (tabl. 6) et supposent un enrichissement en chlorure par rapport au bromure. L'eau de la source Aval du sentier de Taïbit est celle qui possède le rapport Cl/Br le plus élevé mais c'est l'eau de la source ravine Olivette, qui a les concentrations en chlorure et en bromure les plus fortes. Pour ces deux eaux, l'origine des chlorures et des bromures pourrait être soit la dissolution d'évaporites ou bien l'apport de ces éléments par des émanations de vapeur riches en HCl et en HBr.

Ces eaux ainsi que celle de la source Benjouin se détachent des autres également par leurs rapports Cl/Na, qui sont plus élevés (fig. 35). Sur ce diagramme, on peut aussi remarquer que l'eau thermique SLZ1 de l'une des deux sources de la ravine Olivette est probablement issue d'un mélange entre l'eau SLZ13 de l'autre source et une eau plus superficielle. Ceci se distingue également dans le diagramme Cl-Li (fig. 35).

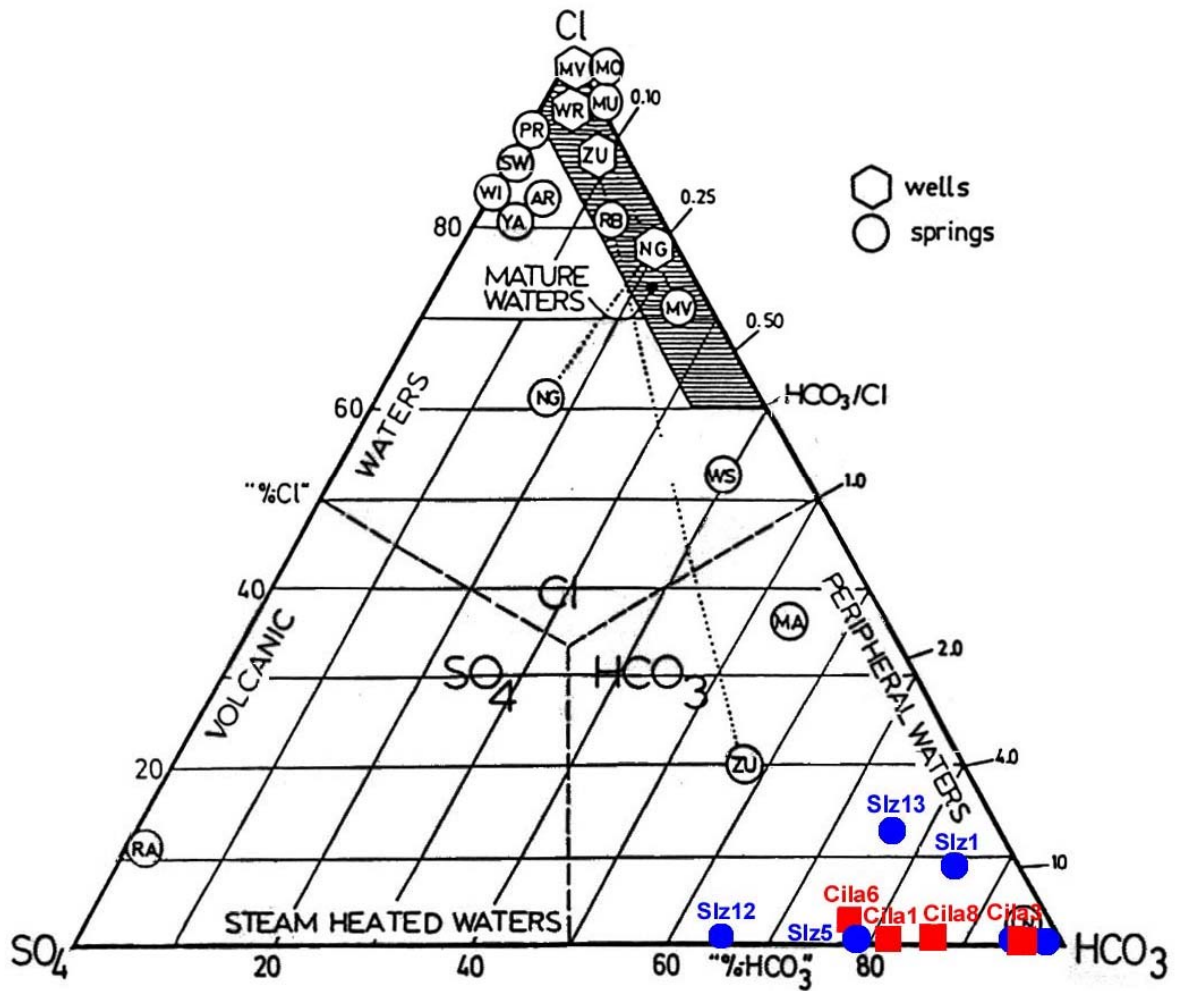


Fig. 34 - Diagramme ternaire $\text{Cl-HCO}_3\text{-SO}_4$ (d'après Giggenbach (1991) dans lequel ont été reportées les eaux thermales des cirques de Salazie (ronds bleus) et de Cilaos (carrés rouges).

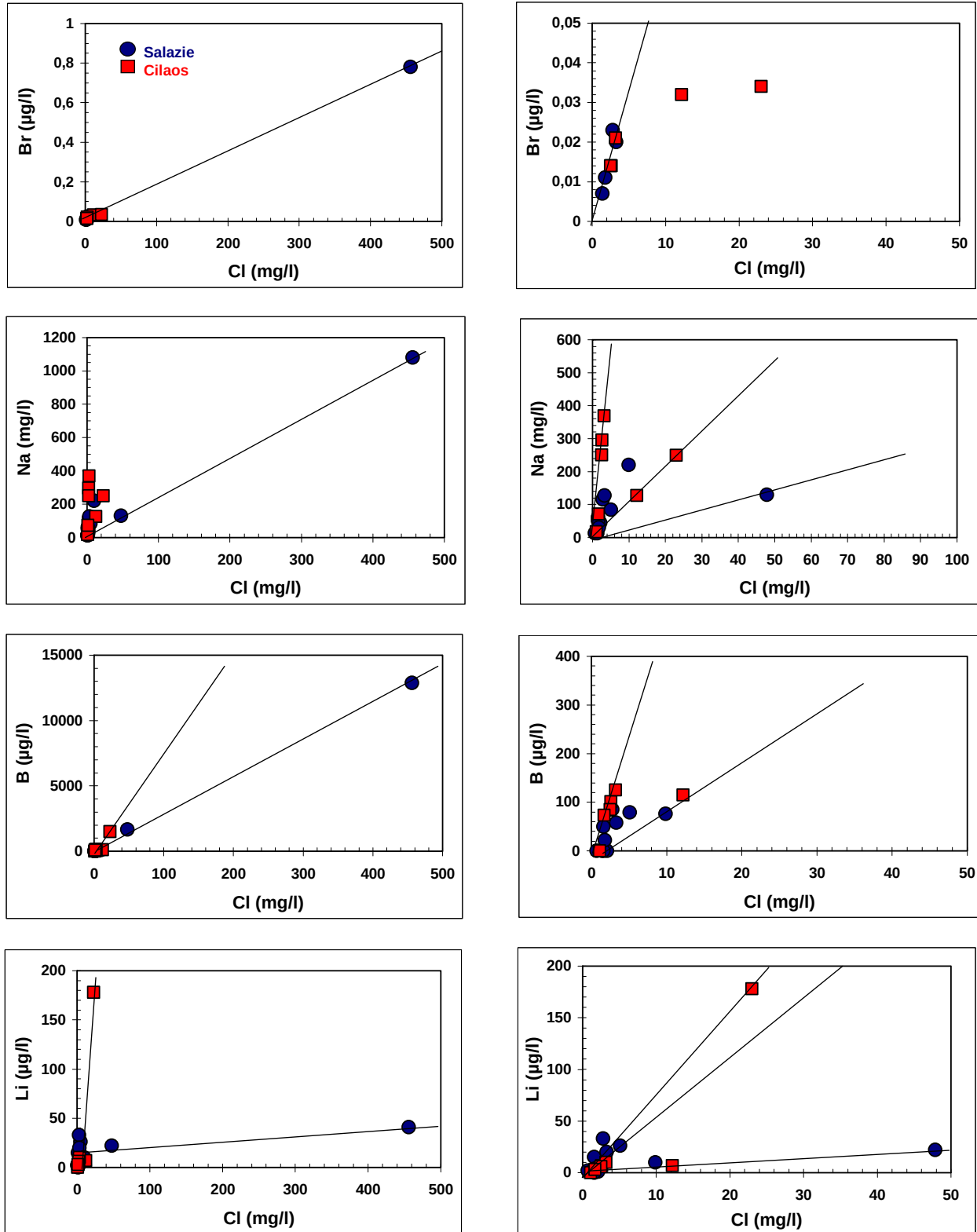


Fig. 35 - Diagrammes binaires représentant les concentrations en bromures, sodium, bore et lithium en fonction de celles en chlorures analysées dans les eaux thermales des cirques de Salazie (ronds bleus) et de Cilaos (carrés rouges).

Les valeurs du rapport Cl/B (concentrations exprimées en mg/l) permettent de classer ces eaux en quatre groupes (fig. 35) :

- celui de l'eau de la source aval du sentier de Taïbit qui possède le rapport Cl/B le plus bas (15) et qui, comme on le verra ultérieurement, est celle qui possède les indices de température en profondeur les plus élevés ;
- celui des eaux des sources ravine Olivette (SLZ1 et SLZ13), Manouilh (SLZ3 et SLZ4), Irénée, Manès et Véronique, qui présentent un rapport Cl/B compris entre 23 et 35 ;
- celui des eaux des sources ravine Bachelier, Grand Sable et la plupart des sources de la rivière du Mât, qui ont un rapport Cl/B compris entre 57 et 82 ;
- celui des eaux des sources Benjouin et rivière du Mât (SLZ9), qui possèdent un rapport Cl/B compris entre 106 et 130.

Les valeurs de ces rapports sont très différentes de celui de l'eau de mer (4100) et sont très largement enrichies en B par rapport au chlorure. La diversité des valeurs du rapport Cl/B suggère une appartenance de ces eaux à des réservoirs souterrains différents. Même si les eaux du massif du piton des Neiges ont des rapports Cl/B proches de ceux de la plupart des eaux géothermales, compris entre 10 et 100, il est, actuellement, difficile de déterminer avec précision l'origine de ces éléments. Les fortes concentrations en bore observées sur les eaux des sources Aval du sentier de Taïbit et ravine Olivette (SLZ13) font pencher pour la présence de vapeurs d'acide borique (H_2BO_3), qui est une espèce très volatile.

Le diagramme Cl-B (fig. 35) confirme que l'eau de la source SLZ1 est issue d'un mélange entre l'eau SLZ13 et une eau plus superficielle. Associé aux diagrammes Cl-Na et Cl-Li (fig. 35) ainsi qu'à ceux de la figure 36, il suggère également que :

- l'eau SLZ3 de l'une des émergences de la source Manouilh provient d'un mélange de l'eau SLZ4 de l'émergence principale avec une eau froide plus superficielle ;
- les eaux des sources Manès et Véronique soit proviennent d'un mélange de l'eau de la source Irénée avec une eau plus diluée, soit sont portées à des températures en profondeur légèrement différentes et interagissent en fonction de ces températures. L'origine de ces eaux sera commentée ultérieurement.

Le diagramme Ca-Mg (fig. 37) indique que la plupart des eaux ont un rapport Ca/Mg constant proche de 2 (rapport molaire proche de 1). Trois groupes d'eaux peuvent être distingués dans les diagrammes HCO_3 -Ca et HCO_3 -Mg (fig. 37) :

- un groupe constitué des eaux thermales des sources ravine Olivette (SLZ1 et SLZ13) et aval du sentier de Taïbit, avec les rapports HCO_3 /Ca et HCO_3 /Mg les plus élevés, ce qui suggère que ces eaux ont les températures les plus fortes en profondeur. En effet, pour une même concentration en HCO_3 , les concentrations en Ca et Mg seront d'autant plus faibles que la température sera élevée car ces éléments sont contrôlés en solution par des minéraux carbonatés (calcite, dolomite) dont la solubilité diminue avec la température ;
- un groupe intermédiaire composé des eaux thermales des sources Irénée, Manès et Véronique ;

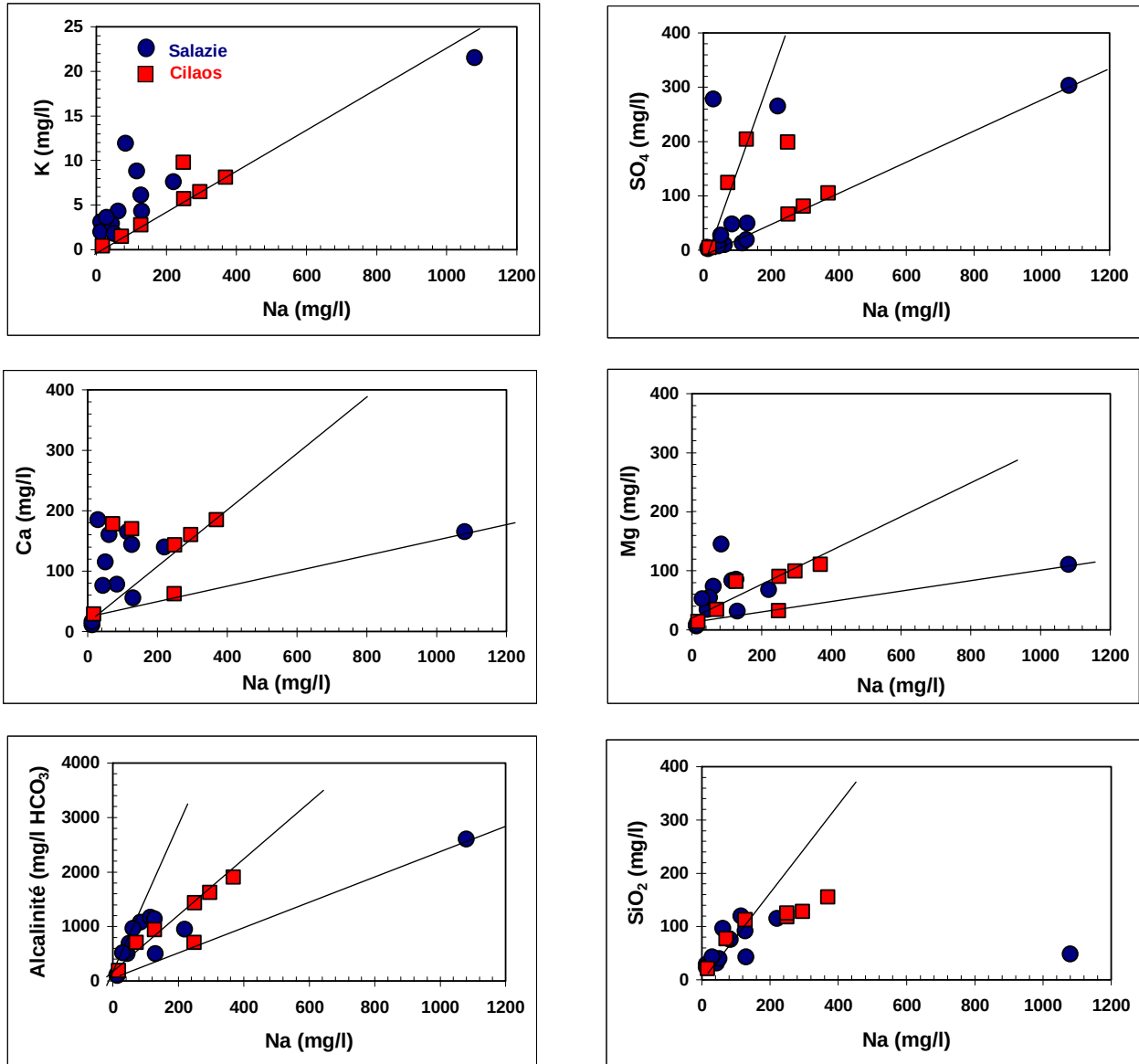


Fig. 36 - Diagrammes binaires représentant les concentrations en potassium, sulfates, calcium, magnésium, bicarbonates et silice dissoute en fonction de celles en sodium analysées dans les eaux thermales des cirques de Salazie (ronds bleus) et de Cilaos (carrés rouges).

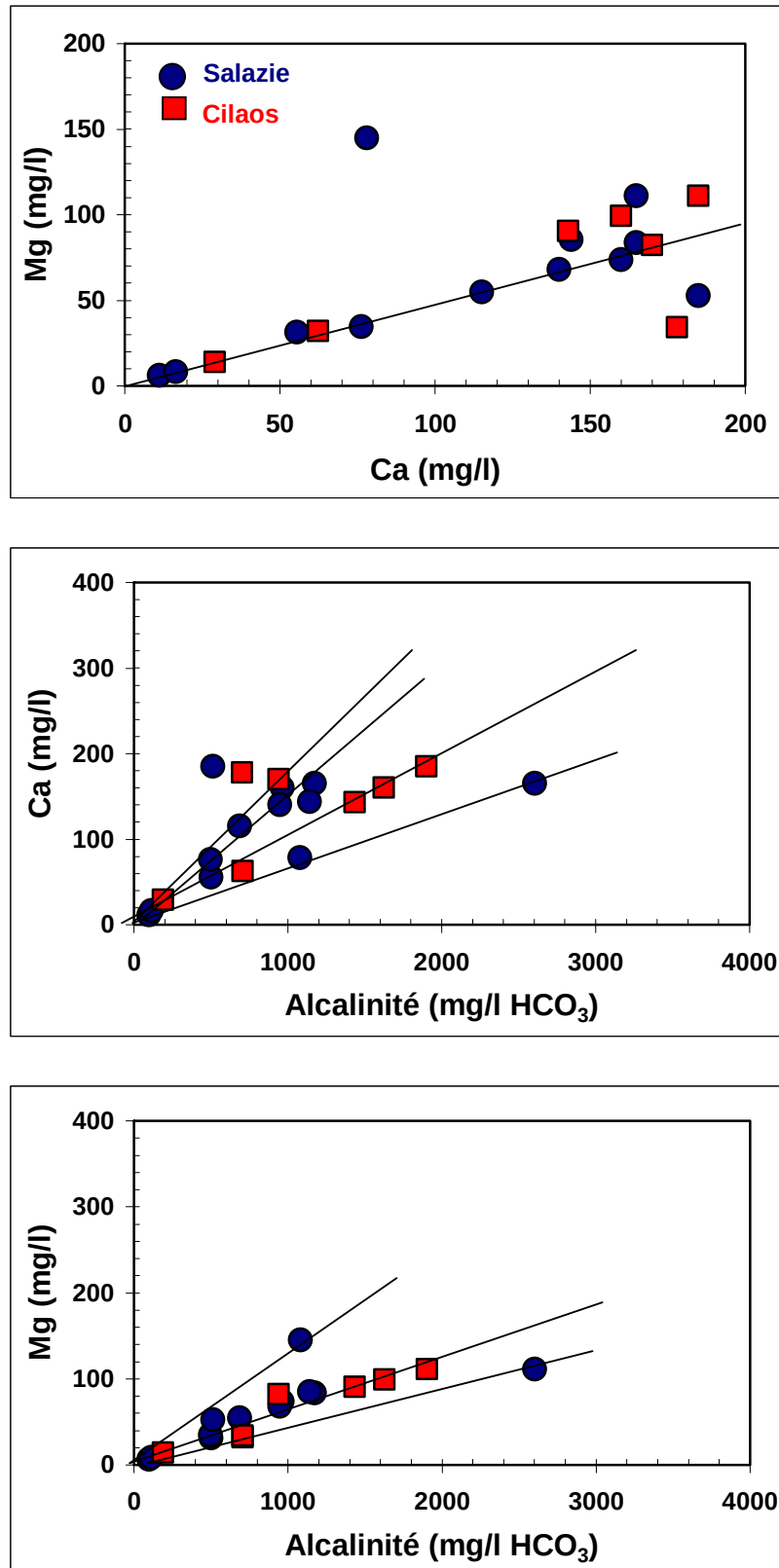


Fig. 37 - Diagramme binaire représentant les concentrations en magnésium en fonction de celles en calcium ainsi que diagrammes binaires représentant les concentrations en calcium et en magnésium en fonction de celles en bicarbonates analysées dans les eaux thermales des cirques de Salazie (ronds bleus) et de Cilaos (carrés rouges).

- un dernier groupe formé par les eaux des sources Benjouin, Manouilh, Bachelier et la majorité des sources de la rivière du Mât.

L'eau de la source rivière du Mât SLZ2 appartient au premier groupe en ce qui concerne sa concentration en calcium mais possède une concentration en magnésium particulièrement élevée, qui la démarque des autres groupes (fig. 37).

Le diagramme Na-SO₄ de la figure 36 indique que, pour la majorité des eaux thermales, les concentrations en sulfates doivent être contrôlées par la dissolution d'un minéral (pyrite ?). Des concentrations anormalement élevées par rapport aux concentrations en sodium sont observées pour les eaux des sources Aval Sentier du Taïbit, ravine Pissa, Benjouin, Grand Sable et rivière du Mât (SLZ9).

On peut aussi remarquer que de l'uranium en solution a été seulement détecté dans l'eau thermique des sources Manouilh, Grand Sable et ravine Olivette (SLZ13) du cirque de Salazie (tabl. 7).

L'établissement d'un suivi chimique de l'eau des sources thermales en fonction du temps n'a pas été facile à réaliser en raison, d'une part, du faible nombre d'analyses chimiques existantes, et d'autre part, de la disparition ou de la mobilité, ou encore, de la difficulté d'accès des émergences de certaines sources. Les résultats de cette recherche sont reportés dans l'annexe 5 où l'on peut remarquer que seules figurent les analyses chimiques des sources bien connues et avec un débit relativement important. Quand il s'agit de plusieurs suintements à très faible débit sur une même paroi, comme cela concerne un certain nombre de sources thermales de la rivière du Mât, il est impossible d'établir ce type de suivi. On peut également constater que les analyses sont souvent incomplètes et que de nombreuses lacunes existent.

Le principal objectif de ce suivi était de voir si la composition chimique de l'eau des sources thermales était plutôt stable ou présentait des variations saisonnières importantes, comme on pouvait le penser en tenant compte de l'observation effectuée par Lopoukhine et Stieltjes, en 1978, sur l'augmentation de la température et la diminution très importante du débit de la plupart des sources non captées, pendant la saison sèche. Malgré le faible nombre d'analyses chimiques et les nombreuses lacunes qui existent dans les données, on peut constater que la composition chimique des eaux des sources thermales du cirque de Cilaos, bien que présentant quelques variations, est plutôt stable, même en ce qui concerne les éléments traces (ann. 5). Des analyses isotopiques en deutérium et oxygène-18 effectuées en 1992 sur les eaux des sources thermales Irénée et Manès (Iundt et Mauroux, 1992), comparées à celles de cette étude, suggèrent des mélanges avec des eaux temporaires plus superficielles. Pour les eaux thermales du cirque de Salazie, des variations de la composition chimique, souvent affectée par des processus de dilution, sont observées sur les sources de Manouilh, Grand Sable et ravine Olivette (SALZ13). Des contributions d'eaux superficielles froides et peu chargées viendraient partiellement alimenter ces eaux.

Afin de mieux cerner l'évolution chimique des eaux des sources thermales et leurs variations naturelles, une surveillance avec une fréquence plus régulière des

concentrations des principales espèces chimiques devrait être réalisée et les données ainsi obtenues pourraient être confrontées avec les suivis hydroclimatiques.

b) Origine des eaux et aires de recharge

Comme le montre la figure 38, les différentes eaux étudiées se placent bien entre la droite des eaux d'origine météorique mondiales et la droite des eaux d'origine météorique locales définies plus précisément par Nicolini *et al.* (1991), à partir des résultats obtenus sur plusieurs analyses de pluies et d'eaux souterraines du massif du piton de La Fournaise. De par leurs valeurs un peu trop positives, il est fort probable que les deux échantillons d'eau de pluie prélevés dans des flaques, dans le cirque de Salazie et de Cilaos, aient subi un léger processus d'évaporation au contact de l'atmosphère (notamment l'eau prélevée dans le cirque de Salazie).

Toutes les eaux thermales, y compris celle de la source ravine Olivette (SLZ13), qui a une minéralisation plus élevée que les autres et une composition chimique particulière, sont bien des eaux d'origine météorique. Par rapport à la majorité des eaux du cirque de Salazie et aux eaux de pluie, on peut noter, pour les eaux thermales de Cilaos et l'échantillon d'eau SLZ2 de Salazie, un léger enrichissement en isotopes lourds de l'oxygène (fig. 38), qui ne suggère pas, néanmoins, d'échanges isotopiques à haute température avec les basaltes.

Toutes les eaux thermales du cirque de Cilaos, à l'exception de celle de la source ravine Pissa, semblent provenir d'une même aire de recharge (valeurs isotopiques en deutérium et oxygène-18 similaires). À partir des résultats obtenus sur les teneurs en oxygène-18 des eaux de pluie prélevées à deux altitudes différentes (860 et 2 250 m), Nicolini *et al.* (1991) ont déterminé un gradient isotopique d'altitude, qui est de -0,24 ‰ pour 100 mètres. Si on utilise ce gradient pour estimer l'altitude moyenne de l'aire de recharge de la plupart des eaux thermales de Cilaos, on trouve alors une altitude d'environ 3 400 mètres. Cette valeur est trop élevée puisqu'elle est supérieure au point culminant de l'île de La Réunion (sommet du piton des Neiges : 3 070 m).

Néanmoins, ce gradient peut atteindre -0,36 ‰ pour 100 m sous l'influence des précipitations cycloniques (Iundt et Mauroux, 1992). Si on prend une valeur moyenne de -0,30 ‰, on trouve alors une altitude moyenne correspondante d'environ 2 800 m pour l'aire de recharge de ces eaux. Compte tenu de l'incertitude de la méthode d'estimation et du léger enrichissement en isotopes lourds de l'oxygène, ceci signifie que l'infiltration de ces eaux aurait pratiquement lieu dans la partie sommitale du piton des Neiges, qui est le seul point aussi élevé.

Les seules analyses isotopiques en deutérium et en oxygène-18 effectuées sur les eaux thermales des sources Manès, Irénée et Véronique que nous ayons trouvées (Iundt et Mauroux, 1992) indiquent des valeurs légèrement plus élevées que celles de cette étude

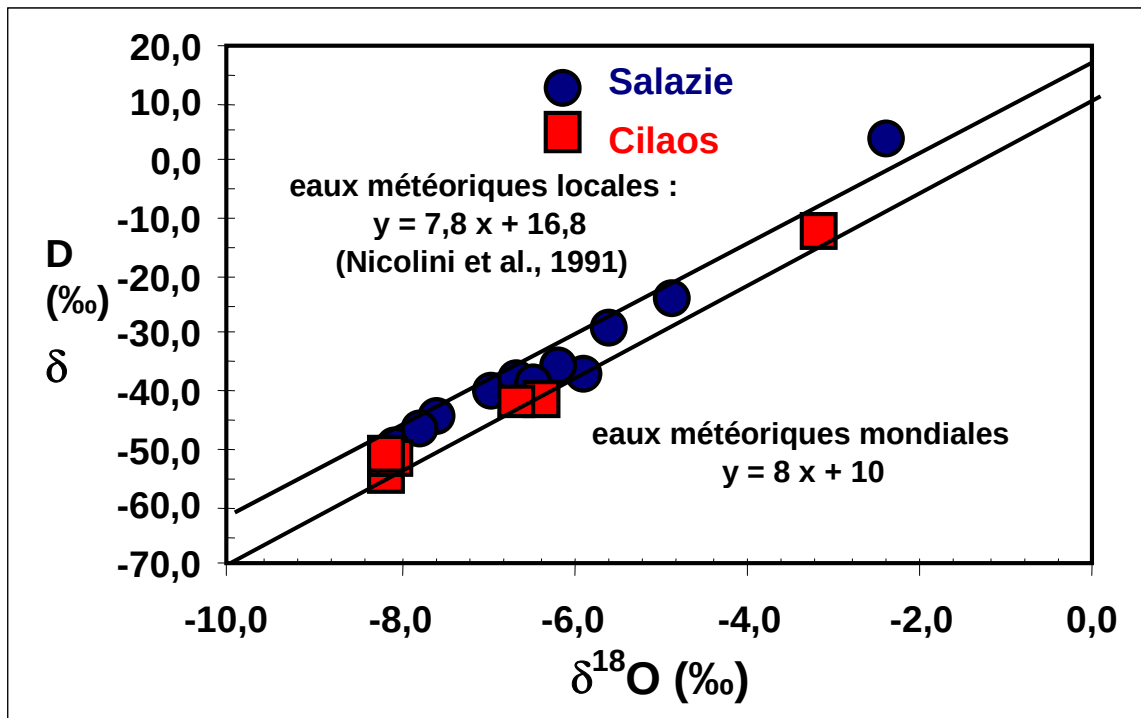


Fig. 38 - Diagramme binaire représentant les teneurs en deutérium en fonction de celles en oxygène-18 des eaux thermales des cirques de Salazie (ronds bleus) et de Cilaos (carrés rouges) ainsi que de quelques eaux superficielles (rivières, ravines, pluies) prélevées dans ces cirques. Toutes les eaux thermales des cirques sont situées entre les deux droites, ce qui indique leur origine météorique. Les deux points qui se détachent (en haut de la figure, à droite) correspondent à deux eaux de pluie prélevées dans des flaques, qui ont probablement subi (surtout pour celle de Salazie) un léger processus d'évaporation.

pour les eaux de Manès et d'Irénée (-7,2 et -46,6 ‰, -7,2 et -46,1 ‰, respectivement) et des valeurs semblables pour l'eau de la source Véronique (-8,6 et -50,7 ‰). À partir des différences observées, Iundt et Mauroux (1992) suggéraient que les sources Irénée et Véronique étaient chacune liée à un système d'alimentation propre et des circuits thermo-minéraux différents. Les résultats actuels semblent démentir cette hypothèse. On peut, plutôt, penser que l'eau des sources Manès et Irénée, en 1992, ait légèrement été affectée par une nappe d'eau superficielle froide comme, par exemple, celle présente à 10 m de profondeur, décrite lors des travaux d'aménagement des thermes (BRGM, 1968b).

Les résultats des analyses chimiques de cette étude montrent que l'eau des sources thermales Manès et Véronique semble subir un léger processus de dilution par rapport à l'eau de la source Irénée. Il ne peut s'agir d'un mélange de ce fluide avec une eau superficielle froide car les valeurs isotopiques pour les trois sources sont identiques. On peut donc penser, plutôt, à un mélange avec une eau plus diluée ayant une aire de

recharge semblable. Des différences de degré d'interaction avec la roche correspondant à de faibles écarts de température en profondeur pourraient également expliquer les légères modifications de composition chimique observées entre ces eaux.

En suivant la même démarche que pour les sources de Cilaos, on peut estimer l'altitude des aires de recharge des autres sources. Ainsi, l'altitude de l'aire de recharge des eaux thermales des sources Manouilh (SLZ4) et ravine Olivette (SLZ13) serait autour de 2 600-2 700 m, qui est proche de celle des eaux thermales de Cilaos et qui suggère également une alimentation en eau provenant essentiellement de la partie sommitale du piton des Neiges. Pour les sources de la rivière du Mât, de la ravine Bachelier ou de la ravine Pissa, l'altitude des aires de recharge serait plutôt de l'ordre de 2 000 à 2 300 mètres.

Les valeurs moins négatives en oxygène-18 des sources du cirque de Salazie peuvent, néanmoins, traduire des processus de mélange de l'eau provenant de la partie sommitale du piton des Neiges avec des eaux plus superficielles froides (altitude de l'aire de recharge moins élevée), comme cela est le cas pour les sources de la ravine Olivette (SLZ1 et dans une moindre mesure, SLZ13) et Manouilh (SLZ3 et à un moindre degré, SLZ4). De plus, cette hypothèse serait en bon accord avec les valeurs de Eh et de pH, qui sont généralement supérieures à celles déterminées sur les eaux de Cilaos ainsi qu'avec les résultats de certaines analyses chimiques.

c) Age et temps de résidence des eaux

Le tritium est un isotope radioactif de l'hydrogène de faible période (12,5 ans), donc instable. Il est produit naturellement par la réaction du rayonnement cosmique sur les noyaux de l'azote de l'air. Cependant, lors des essais thermonucléaires aériens effectués entre 1954 et 1965, des quantités importantes de tritium ont été émises dans l'atmosphère. L'étude de la teneur en tritium dissous dans les eaux souterraines est surtout un outil pour essayer de déterminer leur temps de résidence dans l'aquifère. Comme cet isotope se désintègre progressivement au cours du temps, sa concentration dans l'eau infiltrée dans le sous-sol diminue en fonction du temps de séjour de cette eau.

Actuellement, le tritium est présent en très faible teneur dans l'atmosphère et donc dans les eaux météoriques, depuis l'arrêt des explosions thermonucléaires aériennes dans l'hémisphère nord. Cette teneur est particulièrement faible dans l'hémisphère sud, qui n'a pas connu d'explosions thermonucléaires aériennes. Elle n'était plus que de 13 UT (unité tritium) en 1985 (Nicolini *et al.*, 1991) et n'atteint plus, actuellement, que quelques unités tritium. De ce fait, cet élément ne permet plus de dater les eaux souterraines, mais par contre, il est possible, à partir des teneurs en tritium, de caractériser et de situer, dans le temps, les eaux les unes par rapport aux autres.

L'eau froide superficielle de la ravine Bachelier possède 2 UT (tabl. 8). C'est une eau récente, actuelle, ayant circulé peu de temps. Le résultat obtenu sur l'eau froide superficielle de la ravine Ferrière est quelque peu surprenant (tabl. 8). Toutes les autres eaux thermales, sur lesquelles cet isotope a été analysé, ne possèdent plus de tritium (< 1 UT). Étant donné la teneur moyenne en tritium des eaux d'origine météorique en 1985 (Nicolini *et al.*, 1991), il est fort probable que l'essentiel de ces eaux se soit infiltré avant 1954. Leur âge serait ainsi supérieur à 47 ans, ce qui suggère des temps de

résidence relativement longs. Toutefois, de faibles arrivées d'eaux très jeunes, qui sont mélangées à ces eaux « âgées », ne peuvent être exclues. Pour les eaux thermales des sources de la rivière du Mât, il n'est pas possible de conclure car les analyses de tritium n'ont pas été effectuées.

Les analyses de carbone-14 effectuées sur le carbone total dissous des eaux thermales sélectionnées indiquent des âges relativement anciens, qui vont de 7 310 ans à 28 000 ans (tabl. 8). Ces âges ne permettent pas de dater les eaux dans la mesure où une partie du carbone total dissous provient des émanations de CO₂ profond d'origine magmatique, qui s'est dissous au contact de l'eau et dont l'activité en carbone-14 est nulle (carbone mort). Ces résultats reflètent, donc, plutôt le taux de carbone en solution provenant du CO₂ d'origine magmatique. On peut, alors, conclure que les eaux des sources de l'établissement thermal de Cilaos, représentées par la source Manès, et celles des sources thermales de Manouilh, ravine Olivette et Aval du sentier de Taïbit, sont les plus exposées aux émanations de CO₂ d'origine magmatique. Ceci est en bon accord avec les valeurs de pression partielle en CO₂ calculées pour l'eau de ces sources (voir chapitre e) ou ann. 5).

L'activité en carbone-14 mesurée sur l'eau de la ravine Ferrière correspond à celle d'une eau actuelle (tabl. 8). Par contre, l'eau de la ravine Bachelier semble contenir un peu de carbone en solution d'origine magmatique.

d) Nature des roches en contact avec les eaux

Les mesures des rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de toutes les eaux thermales sont comprises entre 0,70414 et 0,70434 (tabl. 8). Toutes ces valeurs sont voisines de celles trouvées par Louvat et Allègre (1997) pour les principales rivières de l'île de La Réunion, qui varient de 0,70418 à 0,70464. Néanmoins, les mesures les plus basses (fig. 39) sont toutes associées aux eaux thermales du cirque de Cilaos et sont proches de la signature isotopique des basaltes de cette île, qui est autour de 0,70420 (Albarède et Tamagnan, 1988). Par conséquent, on peut conclure que ces valeurs témoignent uniquement d'un processus d'interaction de l'eau avec le basalte et sont en bon accord avec les descriptions des émergences des sources thermales, qui sont le plus souvent associées à la présence de basaltes.

Quant aux valeurs des eaux thermales du cirque de Salazie, elles sont toutes semblables ou supérieures à celles des eaux des ravines (0,70426-0,70428), qui sont des eaux superficielles froides et dont les mesures des rapports isotopiques témoignent non seulement d'un processus d'interaction eau-basalte mais également, d'une légère empreinte océanique apportée par l'eau de pluie d'origine (le rapport isotopique marin est de 0,70907).

D'après ces résultats, on peut donc conclure que le degré d'interaction des eaux thermales du cirque de Cilaos avec le basalte est plus élevé que celui des eaux thermales du cirque de Salazie, ce qui est également en bon accord avec le léger shift en oxygène-18 observé sur la figure 38 pour les eaux de Cilaos et non pour celles de Salazie. Ceci suggère que :

- soit les eaux thermales de Salazie sont portées à des températures moins élevées,

- soit elles circulent plus vite et/ou le rapport eau/roche est plus élevé,
- soit elles se mélangent avec des eaux superficielles froides.

Les trois hypothèses peuvent coexister entre elles mais la troisième a déjà été évoquée à plusieurs reprises.

Le diagramme oxygène-18 de l'eau-oxygène-18 des sulfates dissous de la figure 40 montre une très bonne corrélation linéaire pour la plupart des eaux thermales analysées. Ceci suggère que l'essentiel des sulfates dissous a été produit en utilisant l'oxygène de l'eau comme oxydant et que des échanges en oxygène-18 entre eau et sulfates dissous ont eu lieu. Il pourrait s'agir, très probablement, d'une réaction d'oxydation d'une phase minérale sulfurée. La relation linéaire observée est à rapprocher de l'utilisation du géothermomètre isotopique $\delta^{18}\text{O}(\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O})$ (Mizutani and Rafter, 1969), qui donne également une relation linéaire à température constante et qui sera commentée ultérieurement.

La mesure d'oxygène-18 des sulfates dissous de l'eau thermique de la source ravine Olivette (SLZ 13) est la plus élevée (5,3 ‰) et se détache légèrement de celle des autres (fig. 40). Elle traduit peut-être une influence marine ($\delta^{18}\text{O}_{\text{sulfates}} \approx 9,7$ ‰ pour l'eau de mer actuelle), qui serait en bon accord avec la mesure de soufre-34 observée pour cette eau (8,9 ‰) et qui est également la valeur la plus élevée. Rappelons que pour l'eau de mer actuelle, on a : $\delta^{34}\text{S}_{\text{sulfates}} \approx 20$ ‰. Étant donné la signature isotopique de cette eau en deutérium et en oxygène-18 ainsi que le rapport Cl/Br, qui ne suggèrent pas la présence d'eau de mer, il pourrait s'agir de dissolution d'évaporites d'origine marine tels que l'anhydrite.

Les mesures de soufre-34 des sulfates dissous, qui varient de 3,0 à 5,8 ‰ pour la majorité des eaux thermales, sont supérieures à celles de l'eau de la ravine Bachelier (2 ‰). Ces valeurs traduisent un enrichissement en soufre-34 par rapport à une eau en contact avec un basalte d'origine purement mantellique ($\delta^{34}\text{S} \approx 0$ ‰). Elles sont semblables à celles trouvées pour les coulées de basalte sous-marines du volcan Kilauea, à Hawaï, où l'on constate un enrichissement en soufre-34 des sulfates ($\delta^{34}\text{S}$ autour de 6 ‰) et un appauvrissement en cet isotope des sulfures ($\delta^{34}\text{S}$ autour de -2 ‰), dus à des émissions de SO_2 , appauvries en soufre-34 du magma basaltique, sous des conditions de hautes fugacités en oxygène (Sakai *et al.*, 1982 ; Faure, 1986). Pour les coulées basaltiques subaériennes du Kilauea, les valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ des sulfates sont autour de 2 ‰, qui est la valeur mesurée sur l'eau de la ravine Bachelier.

e) Interactions eau-roche-gaz

Contrairement aux eaux alcalines, qui atteignent l'émergence sans modifications chimiques notables, les eaux carbo-gazeuses présentent une tendance marquée aux ré-équilibrations chimiques au cours de leur remontée (processus de dissolution-précipitation, d'oxydo-réduction et de dégagement de CO_2). Près de la surface, la composition de ces eaux peut être modifiée par mélange avec des eaux superficielles, par acquisition secondaire de sulfates provenant de l'altération de dépôts sulfurés ou bien encore, par dégazage. À l'émergence, le dégagement de CO_2 et l'oxydation par l'air

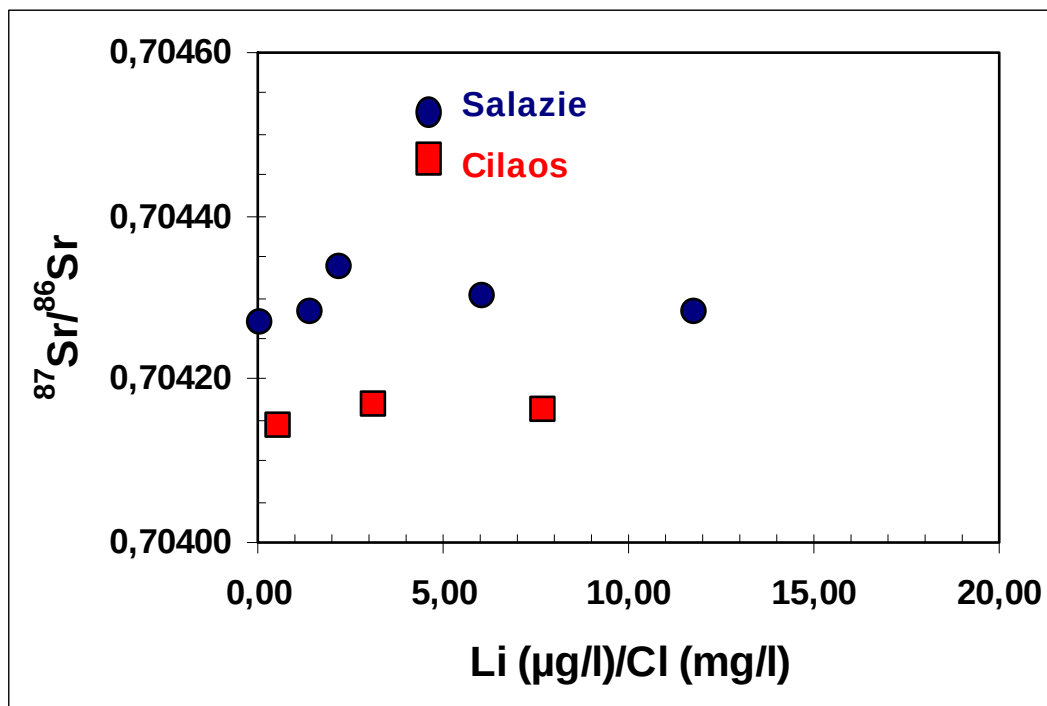


Fig. 39 - Diagramme binaire représentant les rapports isotopiques en strontium en fonction des rapports Li/Cl (concentrations exprimées en $\mu\text{g/l}/\text{mg/l}$) mesurés sur les eaux thermales des cirques de Salazie (ronds bleus) et de Cilaos (carrés rouges).

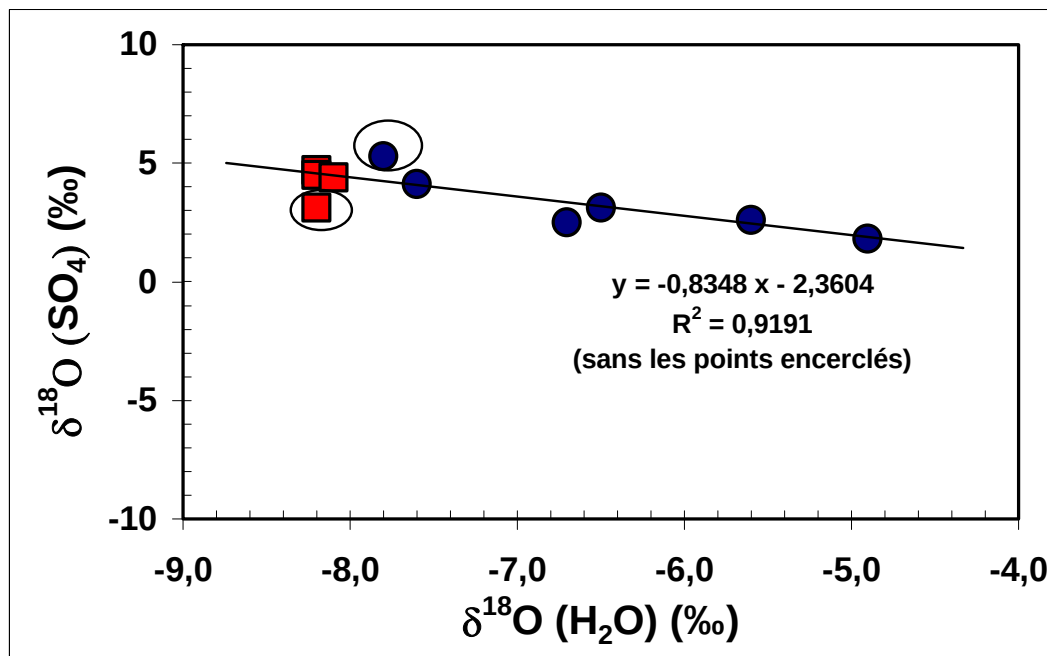


Fig. 40 - Diagramme binaire représentant les teneurs en oxygène-18 des sulfates dissous en fonction de celles en oxygène-18 de l'eau, mesurées sur les eaux thermales de Salazie (ronds bleus) et de Cilaos (carrés rouges).

Afin de mieux comprendre les processus d'interaction eau-roche-gaz, des calculs de spéciation et d'indices de saturation (IS) de la plupart des eaux de cette étude vis-à-vis des principaux minéraux silicatés, carbonatés et sulfatés ont été réalisés au moyen du code géochimique EQ3NR et de la base de données data0.com.R2 (Wolery, 1995). Les réactions d'oxydo-réduction n'ont pas été prises en compte. La concentration en aluminium dissous a été considérée être contrôlée par une réaction d'équilibre de l'eau avec la kaolinite. La température utilisée a été celle mesurée à l'émergence de la source. Les résultats obtenus sont reportés dans les tableaux 10 et 11.

• Estimation des pressions partielles de CO₂ et origine du CO₂

Sur ces tableaux, on peut constater que les valeurs minimales calculées de pression partielle de CO₂ (P_{CO2}) associées aux sources thermales varient de 12,2 mbar à 2,05 bar dans le cirque de Salazie et de 0,4 à 7,6 bar dans le cirque de Cilaos. Les valeurs de P_{CO2} minimales estimées à partir des mesures de pH et d'alcalinité (ann. 5), sont semblables à celles déterminées en utilisant le code EQ3NR. Comme cela est fortement probable pour certaines sources, un dégagement de CO₂ a eu lieu avant l'émergence ou avant la mesure du pH. Pour ces eaux, les valeurs de P_{CO2} en profondeur sont, alors, encore plus élevées et les valeurs de pH doivent être revues à la baisse.

Dans l'ensemble, les sources thermales de Cilaos possèdent des valeurs de P_{CO2} supérieures à celles de Salazie. L'eau de la ravine Bachelier, dans le cirque de Salazie, est à l'équilibre avec la pression partielle de CO₂ de l'atmosphère (0,34 mbar) tandis que l'eau de la ravine Ferrière indique une pression partielle environ 10 fois supérieure (3,5 mbar). Les valeurs de P_{CO2} les plus élevées ont été trouvées pour les eaux thermales des sources Manès, Véronique, Irénée et ravine Olivette (SLZ13), qui sont celles qui ont les valeurs de pH les plus élevées. Les valeurs les plus basses sont associées à la majorité des sources thermales de la rivière du Mât et sont très inférieures à celles observées dans le cirque de Cilaos. Ceci est en bon accord avec la composante superficielle mise en évidence sur la composition chimique de ces eaux.

Les résultats de l'analyse chimique des gaz libres associés à la source Irénée confirment les données des études antérieures et indiquent que le CO₂ constitue l'essentiel des gaz (tabl. 9). Étant donné la faible concentration de certains gaz (en dessous du seuil de détection analytique), il est difficile d'appliquer les géothermomètres à gaz sur ces résultats. Néanmoins, deux des trois géothermomètres utilisés suggèrent une température en profondeur inférieure à 100 °C, ce qui, comme nous allons le voir, est en bon accord avec les résultats de certains géothermomètres chimiques appliqués sur l'eau de cette source.

Des analyses isotopiques en carbone-13 ont été réalisées sur des échantillons d'eau sélectionnés afin de déterminer l'origine du carbone. Les valeurs de carbone-13 déterminées sur les eaux thermales des trois sources de Cilaos (Manès, aval du sentier de Taïbit, Benjouin) et des sources Manouilh et ravine Olivette (SLZ13), dans le cirque de Salazie, sont comprises entre 1,8 et 3,2 ‰ (tabl. 8). Ces valeurs sont très supérieures à celle déterminée par Marty *et al.* (1993) sur les gaz dissous de l'eau thermale de la source Manès (-3,3 ‰).

Echantillon	Sce Rav. Oliv. SLZ1	Sce Riv. Mât SLZ2	Sce Manouilh SLZ4	Sce Bachelier SLZ7	Sce Riv. Mât SLZ9	Sce Rav. Fouquet SLZ11	Sce Rav. G. Sable SLZ12	Sce Rav. Oliv. SLZ13	Rav. Bachelier SLZ8
Date	18/10/00	18/10/00	19/10/00	21/10/00	21/10/00	21/10/00	22/10/00	26/10/00	21/10/00
T (°C)	18,9	18,0	30,6	19,4	26,1	19,2	18,6	26,0	15,7
pH	7,26	7,87	6,59	7,42	7,39	7,39	6,57	6,05	8,49
Alc. (mg/l HCO ₃)	500	1080	1172	1141	949	689	513	2603	115,0
P _{CO2} (mbar)	24,1	12,2	301	37,1	36,1	24,5	118	2048	0,33
Al _{calculé} (µg/l)	0,124	0,227	0,007	0,087	0,017	0,181	0,006	0,344	0,194
IS Albite	-2,59	-1,70	-0,63	-1,81	0,47	-2,95	-1,93	-0,97	-0,83
IS Anhydrite	-2,41	-2,51	-2,64	-2,61	-1,43	-2,43	-1,28	-1,56	-3,72
IS Anorthite	-8,89	-7,70	-8,80	-8,19	-7,69	-8,31	-9,84	-10,43	-7,15
IS Aragonite	-0,05 (sat.)	0,92	0,20 (sat.)	0,80	0,74	0,51	-0,28 (sat.)	-0,24 (sat.)	0,10 (sat.)
IS Barytine	sous-saturation	-1,13	-1,43	sous-saturation	-0,33 (sat.)	sous-saturation	sous-saturation	-0,69	sous-saturation
Beidellite-Ca	-1,26	-0,72	0,41	-0,72	0,67	-1,22	-0,07 (sat.)	-0,29 (sat.)	0,08
Beidellite-Mg	-1,24	-0,61	0,45	-0,69	0,69	-1,21	-0,10 (sat.)	-0,24 (sat.)	0,09
IS Calcédoine	-0,29 (sat.)	-0,04 (sat.)	0,93	0,03 (sat.)	0,99	-0,33 (sat.)	0,71	0,61	0,49
IS Calcite	0,10 (sat.)	1,07	0,35 (sat.)	0,94	0,89	0,66	-0,14 (sat.)	-0,10 (sat.)	0,25 (sat.)
IS Célestite	-3,70	-3,55	-3,92	-3,69	-2,68	-3,58	-2,49	-2,47	-4,98
IS Cristobalite	-0,58	-0,32	0,65	-0,26 (sat.)	0,71	-0,62	0,43	0,33 (sat.)	0,20 (sat.)
IS Dolomite	1,32	3,80	1,84	3,05	2,86	2,38	0,54	1,05	1,56
IS Dolomite Désord.	-0,27 (sat.)	2,20	0,34 (sat.)	1,46	1,32	0,79	-1,06	-0,49	-0,06 (sat.)
IS Epidote	-2,58	-0,06 (sat.)	-2,28	sous-saturation	2,14	sous-saturation	sous-saturation	-8,61	1,62
IS Fluorite	-2,72	-3,68	-2,83	-3,40	-2,88	sous-saturation	-2,64	-1,91	-4,00
IS Gypse	-2,18	-2,27	-2,52	-2,38	-1,27	-2,20	-1,04	-1,40	-3,45
IS Heulandite	sous-saturation	-1,52	1,09	sous-saturation	2,91	sous-saturation	sous-saturation	-1,46	nd
IS Illite	-1,35	0,01 (sat.)	-0,12 (sat.)	-0,61	0,67	-1,42	-0,93	-0,98	0,58
IS Kaolinite	0,00 (sat.)	0,00 (sat.)	0,00 (sat.)	0,00 (sat.)	0,00 (sat.)	0,00 (sat.)	0,00 (sat.)	0,00 (sat.)	0,00 (sat.)
IS K-feldspar	-1,16	0,39	0,98	-0,22 (sat.)	1,81	-1,49	0,07 (sat.)	0,13 (sat.)	1,33
IS Magnésite	-0,45	1,05	-0,10 (sat.)	0,44	0,35 (sat.)	0,05 (sat.)	-1,00	-0,48	-0,38 (sat.)
IS Montmorillonite-Ca	-0,70	0,68	1,98	0,39	2,73	-0,53	1,08	0,55	2,04
IS Montmorillonite-K	-1,12	0,40	1,51	-0,04 (sat.)	2,29	-1,13	0,55	0,25 (sat.)	1,61
IS Montmorillonite-Mg	-0,61	0,86	2,09	0,49	2,82	-0,45	1,12	0,67	2,12
IS Montmorillonite-Na	-0,92	0,39	1,63	0,11 (sat.)	2,51	-0,93	0,57	0,55	1,59
IS Muscovite	-0,18 (sat.)	0,85	-0,45	0,12 (sat.)	0,24 (sat.)	-0,43	-0,97	-0,68	0,72
IS Pyrophyllite	-1,72	-1,21	0,81	-1,08	0,90	-1,80	0,29 (sat.)	0,15 (sat.)	-0,17 (sat.)
IS Quartz	-0,02 (sat.)	0,24 (sat.)	1,19	0,30 (sat.)	1,26	-0,06 (sat.)	0,99	0,88	0,77
IS Sidérite	-6,44	-7,51	-0,22 (sat.)	sous-saturation	-5,00	sous-saturation	sous-saturation	-1,73	-7,16
IS Smectite-high-Fe-Mg	-5,74	-3,30	-0,77	sous-saturation	-0,62	sous-saturation	sous-saturation	-4,98	-1,19
IS Smectite-low-Fe-Mg	-3,68	-1,43	0,47	sous-saturation	1,16	sous-saturation	sous-saturation	-2,79	0,42
IS Strontianite	-0,38	0,85	-0,17 (sat.)	0,67	0,43	0,32 (sat.)	-0,53	-0,22 (sat.)	-0,19 (sat.)
IS Wairakite	-8,43	-6,71	-5,91	-7,09	-4,67	-7,92	-7,36	-8,17	-5,10
IS Withérite	nd	1,62	0,75	nd	1,17	nd	-0,18 (sat.)	-0,05 (sat.)	nd

nd : non déterminé

Tabl. 10 - Calcul des indices de saturation (IS) des eaux de certaines sources thermales de Salazie vis-à-vis de quelques minéraux, réalisés au moyen du code géochimique EQ3NR

Echantillon	Sce Benjouin CILA1	Sce Manès CILA2	Sce Irénée CILA3	Sce Aval Sentier Taïbit CILA6	Rav. Ferrière CILA7
Date	24/10/00	24/10/00	24/10/00	25/10/00	25/10/00
T (°C)	22,6	31,0	37,8	36,3	23,0
pH	6,66	5,33	5,98	6,32	7,72
Alc. (mg/l HCO ₃)	941	1626	1903	707	189
P _{CO2} (mbar)	183	7543	2160	373	3,5
Al _{calculé} (µg/l)	0,003	0,028	0,007	0,201	0,114
IS Albite	-0,45	-1,44	-0,61	-0,58	-1,68
IS Anhydrite	-1,49	-1,92	-1,74	-1,69	-3,51
IS Anorthite	-9,36	-11,34	-9,44	-9,27	-7,79
IS Aragonite	0,06 (sat.)	-0,98	-0,13 (sat.)	-0,61	-0,12 (sat.)
IS Barytine	sous-saturation	sous-saturation	-1,43	-0,06 (sat.)	sous-saturation
Beidellite-Ca	0,47	0,02 (sat.)	0,31 (sat.)	0,24 (sat.)	-0,27 (sat.)
Beidellite-Mg	0,48	0,07 (sat.)	0,37	0,28 (sat.)	-0,25 (sat.)
IS Calcédoine	1,05	0,95	0,92	0,85	0,31 (sat.)
IS Calcite	0,20 (sat.)	-0,84	0,01 (sat.)	-0,46	0,02 (sat.)
IS Célestite	-2,98	-2,95	-2,79	-2,88	-4,60
IS Cristobalite	0,77	0,68	0,66	0,59	0,03 (sat.)
IS Dolomite	1,48	-0,44	1,27	0,21 (sat.)	1,12
IS Dolomite Désord.	-0,08 (sat.)	-1,94	-0,19 (sat.)	-1,26	-0,44
IS Epidote	-2,91	-10,90	-5,29	-5,17	nd
IS Fluorite	-3,37	sous-saturation	sous-saturation	-0,97	sous-saturation
IS Gypse	-1,29	-1,81	-1,68	-1,62	-3,32
IS Heulandite	nd	sous-saturation	0,22 (sat.)	0,27 (sat.)	sous-saturation
IS Illite	-0,37 (sat.)	-1,55	-0,68	-0,48	-0,71
IS Kaolinite	0,00 (sat.)	0,00 (sat.)	0,00 (sat.)	0,00 (sat.)	0,00 (sat.)
IS K-feldspar	0,75	-0,38	0,35 (sat.)	0,64	-0,48
IS Magnésite	-0,37 (sat.)	-1,19	-0,30 (sat.)	-0,89	-0,54
IS Montmorillonite-Ca	2,11	0,79	1,56	1,47	1,16
IS Montmorillonite-K	1,53	0,28 (sat.)	1,03	1,05	0,41
IS Montmorillonite-Mg	2,20	0,91	1,69	1,58	1,24
IS Montmorillonite-Na	1,80	0,58	1,35	1,28	0,67
IS Muscovite	-0,95	-1,85	-1,05	-0,62	-0,69
IS Pyrophyllite	0,99	0,86	0,85	0,70	-0,49
IS Quartz	1,32	1,21	1,18	1,11	0,58
IS Sidérite	-0,40	-1,10	-0,25 (sat.)	-1,56	sous-saturation
IS Smectite-high-Fe-Mg	-1,16	-5,84	-2,42	-2,69	sous-saturation
IS Smectite-low-Fe-Mg	0,27	-3,39	-0,81	-0,98	sous-saturation
IS Strontianite	-0,48	-1,10	-0,30 (sat.)	-0,90	-0,26 (sat.)
IS Wairakite	-6,21	-8,42	-6,58	-6,54	-6,12
IS Withérite	nd	sous-saturation	-0,48	0,36	nd

nd : non déterminé

Tabl. 11 - Calcul des indices de saturation (IS) des eaux de certaines sources thermales de Cilaos vis-à-vis de quelques minéraux, réalisés au moyen du code géochimique EQ3NR.

Si on utilise ces valeurs pour reconstituer la composition isotopique en carbone-13 des gaz libres associées à ces sources au moyen des équations de fractionnement isotopique entre gaz et espèces en solution (CO_2 aqueux et HCO_3), on peut remarquer que les valeurs obtenues, qui restent positives entre 25 et 100 °C, ne sont pas du tout en bon accord avec les valeurs en carbone-13 (autour de -5 et -4 ‰) déduites par Marty *et al.* (1993), à partir des mesures faites sur les gaz libres et/ou les gaz dissous de la plupart de ces sources. Ces valeurs sont considérées par Marty *et al.* (1993) comme représentatives d'une origine magmatique et sont semblables à celles des systèmes volcaniques Hot Spot tels que le Kilauea (Hawaï). Elles sont plus fiables que les valeurs uniquement estimées à partir des mesures de carbone-13 dans les eaux.

En effet, étant donné les fortes pressions de CO_2 , qui ont été trouvées sur ces sources thermales, il est possible qu'un dégagement important de ce gaz avant le prélèvement, voir avant l'émergence, soit responsable de l'enrichissement en carbone-13 constaté dans les eaux thermales. La formation de calcite observée à l'émergence de nombreuses sources peut également perturber la signature isotopique d'origine des eaux. D'ailleurs, Marty *et al.* (1993) remettent en cause la valeur anormalement élevée obtenue sur les gaz dissous de la source Bachelier, ce qui semble être confirmé par cette étude où la valeur mesurée est plus basse (-1,1 ‰). Dans ces conditions, il est difficile de faire une quelconque interprétation des teneurs en carbone-13 obtenues uniquement sur les eaux thermales et des mesures isotopiques sur les gaz libres sont absolument nécessaires.

• Calcul des indices de saturation (IS) vis-à-vis de certains minéraux

Les calculs des indices de saturation effectués au moyen du code géochimique EQ3NR, à la température d'émergence des sources, montrent que la plupart des eaux est saturé ou sur-saturé vis-à-vis des minéraux carbonatés tels que la calcite (CaCO_3), la dolomite désordonnée ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), la strontianite (SrCO_3) ou la withérite (BaCO_3) (tabl. 10 et 11). Ceci explique que l'on observe la formation de minéraux de ce type à l'émergence de nombreuses sources. Les fortes pressions de CO_2 et le dégagement de ce gaz, en surface, sont, en grande partie, responsables de ces précipitations. Des sous-saturations vis-à-vis des minéraux carbonatés sont observées sur les eaux des sources Manès, Véronique et Aval du Sentier du Taïbit, qui ont eu, très probablement, des dégagements de CO_2 modérés et qui ont, donc, gardé des valeurs de pH relativement basses. La solubilité de la plupart des minéraux carbonatés diminuant avec la profondeur, si le dégagement de CO_2 en surface est limité, plus les eaux seront chaudes en profondeur et plus elles seront sous-saturées vis-à-vis de ces minéraux en remontant à la surface et en se refroidissant.

Toutes les eaux thermales sont sous-saturées vis-à-vis de l'anhydrite (CaSO_4) et de la fluorite (CaF_2). À l'exception de celles des sources Aval Sentier du Taïbit et rivière du Mât (SLZ9), qui sont saturées vis-à-vis de la barytine (BaSO_4), toutes les autres eaux sont sous-saturées par rapport à ce minéral. La plupart des eaux est sur-saturée vis-à-vis de la calcédoine et du quartz, qui sont des phases plus solubles à température croissante. En considérant que les eaux sont à l'équilibre avec la kaolinite à la température d'émergence, comme cela a été supposé, on s'aperçoit que la plupart des eaux est sous-saturée vis-à-vis de l'albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) mais est sur-saturée vis-à-vis des

montmorillonites et des beidellites (smectites). Ceci est en bon accord avec la formation de ces minéraux observée à l'émergence des sources thermales.

Des calculs d'indices de saturation ont été réalisés à 90 °C pour l'eau thermique de la source Manouilh, à 100 °C pour celles des sources Irénée et ravine Olivette (SLZ13) et à 120 °C pour celle de la source Aval Sentier du Taïbit, en supposant que l'équilibre de ces eaux vis-à-vis de la calcite et de la kaolinite était atteint à ces températures. Nous verrons que ces sources et les valeurs de température ont été choisies en fonction des résultats obtenus avec les géothermomètres chimiques. Les résultats de ces calculs montrent que :

- les valeurs de P_{CO_2} sont alors relativement élevées (de l'ordre de 6 bar sur Manouilh, de 24 bar sur ravine Olivette, de 23 bar sur Irénée et de 3 bar sur Aval Sentier du Taïbit). Si les valeurs des températures choisies avaient été plus élevées, les pressions partielles de CO_2 seraient encore supérieures, ce qui rend improbable l'existence de températures en profondeur supérieures à 100 °C pour les sources Manouilh et surtout, ravine Olivette et Irénée ;
- ces eaux sont saturées vis-à-vis de la dolomite désordonnée, la magnésite ($MgCO_3$), mais aussi vis-à-vis de la calcédoine ou du quartz ;
- à l'exception de l'eau de la source ravine Olivette, qui indique un état de sous-saturation, elles sont également saturées vis-à-vis de la sidérite ($FeCO_3$), des montmorillonites sodiques et potassiques, des beidellites calciques et magnésiennes et de la pyrophyllite (smectites) ;
- elles restent toutes sous-saturées vis-à-vis de l'anhydrite et de la fluorite ;
- elles sont légèrement sous-saturées vis-à-vis de la barytine, de la strontianite et de la withérite ;
- elles sont toutes sous-saturées vis-à-vis de l'albite, du feldspath potassique ($KAlSi_3O_8$) et de la muscovite ($KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$). Néanmoins, l'eau de la source Aval Sentier du Taïbit est proche de l'équilibre avec ce dernier minéral.

Nous verrons que la plupart de ces résultats a une incidence forte sur le choix de l'utilisation des géothermomètres chimiques. Le fait que toutes ces eaux soient sous-saturées vis-à-vis de l'albite, du feldspath potassique et de la muscovite et qu'elles atteignent, aux températures choisies pour les calculs de saturation, l'équilibre avec les smectites (montmorillonites et beidellites), minéraux argileux, semble confirmer les conditions de température relativement faible estimées en profondeur.

f) Géothermomètres chimiques

Le diagramme triangulaire de Giggenbach (1988) de la figure 41 indique que toutes les eaux thermales des cirques de Cilaos et de Salazie sont situées dans la zone classée « eaux immatures », hors d'un équilibre complet avec la roche et proches du pôle magnésium, ce qui n'est pas un indice de forte température en profondeur. Ces propriétés caractérisent souvent les eaux carbo-gazeuses et se traduisent par une

discordance importante entre les résultats des différents géothermomètres chimiques. L'application de ces derniers doit donc être effectuée avec beaucoup de précaution.

La plupart des géothermomètres chimiques connus a été appliquée sur les eaux thermales des cirques de Salazie et de Cilaos. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 12.

Pour les eaux thermales de Cilaos, on peut constater que les géothermomètres à silice (calcédoine ; Fournier and Rowe, 1966), Na/K, Na/K/Ca ($\beta = 1/3$), Ca/K, K/Sr et Na/Rb donnent des valeurs de température relativement convergentes, qui vont de 75 (source Benjouin) à 120-130 °C (source aval Sentier Taïbit). Pour ces eaux, on peut considérer que de nombreuses réactions chimiques entre minéraux et solution sont à l'équilibre. La silice dissoute pourrait être contrôlée soit par la calcédoine, soit par le quartz. Néanmoins, d'après Arnorsson (1975) et Michard (1990), en milieu basaltique, la silice dissoute est plutôt contrôlée par le quartz à des températures supérieures à 150-170°C et par la calcédoine à des températures inférieures.

En ce qui concerne les eaux du cirque de Salazie, on remarque que les valeurs de température obtenues à partir des géothermomètres Na/K et Na/K/Ca ($\beta = 1/3$) sont souvent beaucoup trop élevées. Ce type de résultats est largement observé en milieu superficiel granitique ou basaltique car le rapport Na/K n'est pas contrôlé par une réaction d'équilibre avec des minéraux (Michard, 1979).

Seules les valeurs estimées à partir des géothermomètres Ca/K, Sr/K, Na/Rb et Fe/K donnent des valeurs de température convergentes, qui vont de 40 (source Fouquet) à 100 °C (source ravine Mât, SLZ2 ; source ravine Olivette, SLZ13). Les valeurs obtenues à partir du géothermomètre à silice (calcédoine ; Fournier and Rowe, 1966) sont souvent plus basses que les autres car, comme nous l'avons suggéré, des eaux superficielles viennent se mélanger avec les eaux plus profondes et les concentrations en silice sont donc diluées (voir diagramme Na-SiO₂ de la figure 36). Lors de la remontée des fluides et de leur refroidissement, la silice dissoute peut également être précipitée.

Pour les eaux des rivières (Mât) ou des ravines (Bachelier, Ferrière), nous remarquons que le géothermomètre à silice (calcédoine ; Fournier and Rowe, 1966) est le seul à donner de bonnes estimations de température pour toutes les eaux.

Les géothermomètres Ca/K et Sr/K, utilisés généralement en milieu granitique (Michard, 1990), semblent donner de bons résultats car les concentrations en calcium, potassium et strontium en solution sont probablement contrôlées, en profondeur, par des minéraux (calcite, smectites). Ensuite, les rapports des concentrations de ces espèces sont peu modifiés au cours de la remontée et du refroidissement de ces eaux car les principaux mécanismes susceptibles d'affecter la composition chimique de ces eaux sont des processus de mélange avec des eaux superficielles beaucoup moins concentrées en ces espèces.

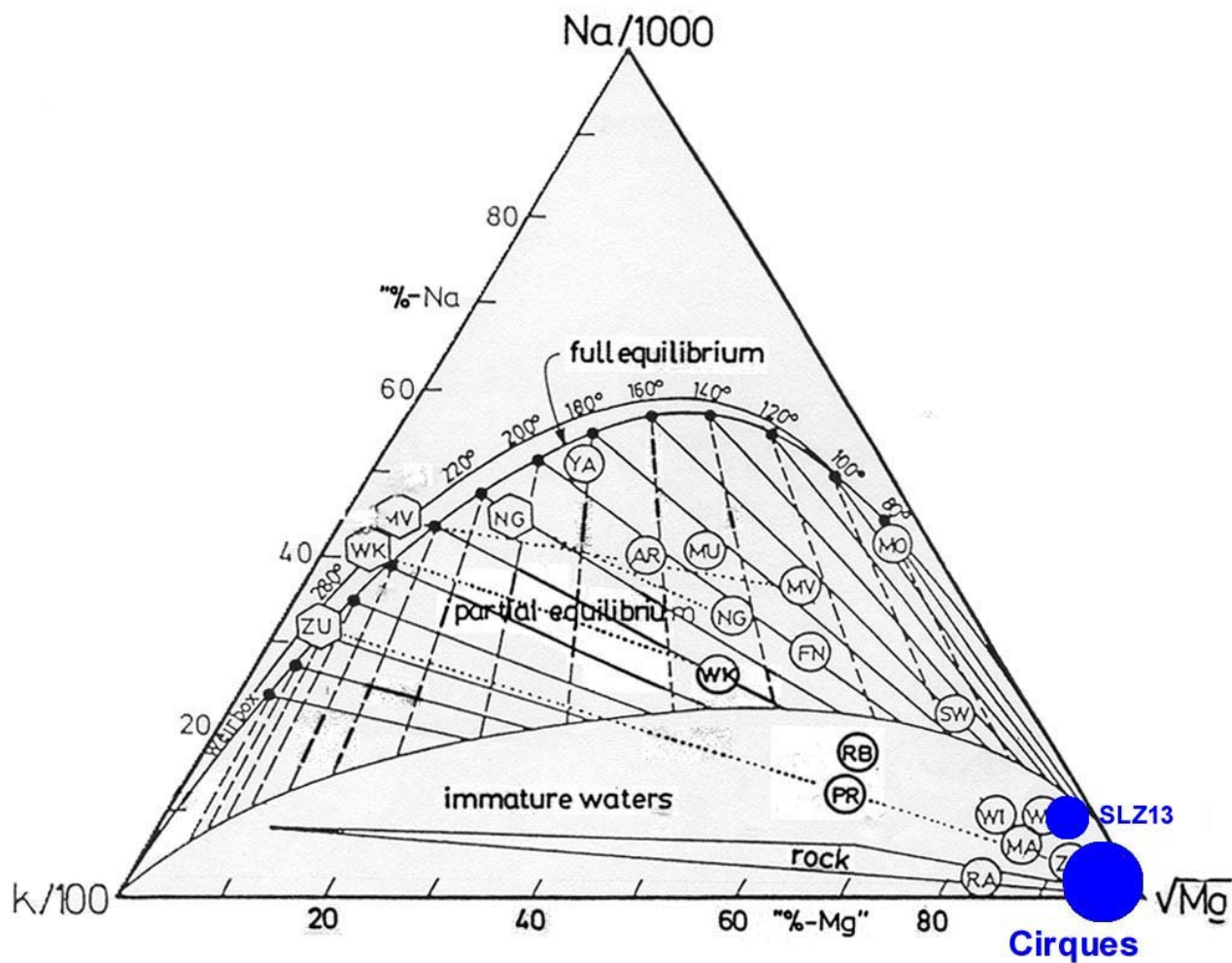


Fig. 41 - Diagramme ternaire Na-K-Mg (d'après Giggenbach (1988)) appliqué aux eaux thermales des cirques de Salazie et de Cilaos.

Point d'eau	n°	T _{émerg.} °C	T _{Qz} °C	T _{Calced.(1)} °C	T _{Calced.(2)} °C	T _{SiO2am.} °C	T _{Na/K (1)} °C	T _{Na/K (2)} °C	T _{Na/K/Ca (β=4/3)} °C	T _{Na/K/Ca (β=1/3)} °C	T _{Ca/K} °C	T _{K/Mg} °C	T _{Na/Li (1)} °C	T _{Na/Li (2)} °C	T _{K/Sr} °C	T _{Na/Rb} °C	T _{Fe/K} °C	T _{δ¹⁸O(H2O-SO4)}	T _{estimée} °C
CIRQUE DE SALAZIE																			
Source Ravine Olivette, rive droite	SLZ1	18,9	95	37	73	-20	104	137	53	117	88	37	74	2	89	nd	75	185	90±20
Source Rivière du Mât	SLZ2	18,0	122	62	99	3	237	248	73	174	124	42	95	23	119	nd	136	nd	100±20
Source Manouilh, rive gauche	SLZ3	19,0	135	74	111	15	161	187	29	130	69	29	88	15	59	nd	53	nd	75±20
Source Manouilh, rive gauche	SLZ4	30,6	148	86	124	27	170	194	52	143	95	41	93	20	93	95	18	154	90±20
Rivière du Mât (amont Manouilh)	SLZ5	12,4	78	22	57	-34	307	301	53	185	107	46	71	-2	115	nd	61	nd	20±10
Source pétillante ravine Bachelier, rive droite	SLZ7	19,4	133	72	109	13	131	161	45	125	83	34	72	0	73	88	< 100	192	80±20
Ravine Bachelier, amont source pétillante	SLZ8	15,7	69	13	48	-42	245	254	34	159	81	34	71	-1	80	nd	< 51	nd	20±10
Source rivière du Mât, rive droite	SLZ9	26,1	146	84	121	24	107	140	57	120	93	40	36	-35	89	nd	46	nd	90±20
Source rivière du Mât, rive gauche	SLZ10	21,2	81	25	60	-31	158	184	29	129	68	29	19	-51	53	nd	67	nd	60±20
Source Ravine Fouquet	SLZ11	19,2	91	34	70	-23	107	140	12	102	45	16	16	-54	33	nd	47	nd	40±10
Source Ravine Grand Sable, rive droite	SLZ12	18,6	95	37	73	-20	218	233	17	142	60	29	68	-4	51	118	76	243	70±20
Source Ravine Olivette, rive droite	SLZ13	26,0	100	42	78	-15	72	109	105	117	135	56	31	-40	118	60	90	136	100±20
CIRQUE DE CILAO																			
Source rivière Bras de Benjouin, rive gauche	CILA1	22,6	144	83	120	23	78	114	23	94	54	21	41	-31	55	49	-11	138	75±20
Source Dr Manès, captage anciens thermes	CILA2	31,0	152	90	127	30	77	114	53	105	84	34	20	-50	67	80	-2	nd	100±20
Source Irenée, captage anciens thermes	CILA3	37,8	163	101	145	41	77	114	59	106	89	37	24	-46	73	81	1	141	100±20
Source Véronique, captage anciens thermes	CILA4	30,3	147	85	123	25	79	116	50	104	81	32	18	-52	64	89	-4	143	100±20
Source Aval Sentier Taïbit, rive droite Bras Rouge	CILA6	36,3	150	88	126	29	115	148	83	132	121	53	130	59	113	106	68	159	130±25
Ravine Ferrière	CILA7	23,0	65	10	40	-44	79	115	-7	82	22	3	33	-38	5	nd	0	nd	20±10
Source ravine Pissa, près pont Salazes, rive gauche	CILA8	18,4	123	63	100	5	76	112	5	86	35	18	32	-39	8	nd	-23	nd	60±20

T_{Qz}, T_{Calced.(1)}, T_{SiO2am.} : Fournier and Rowe (1966) ; T_{Calced.(2)} : Helgeson et al. (1978).

T_{Na/K (1)} : Fournier (1979) ; T_{Na/K (2)} : Michard (1979).

T_{Na/K/Ca} : Fournier and Truesdell (1973). La correction avec Mg (Fournier and Potter, 1979) donne des résultats incohérents par rapport au géothermomètre silice, qui ne sont pas reportés ici.

T_{K/Mg} : Giggenbach (1988).

T_{Ca/K}, T_{K/Sr}, T_{Na/Rb} and T_{Fe/K} : Michard (1990).

T_{Na/Li (1)} : Kharaka et al. (1982) ; T_{Na/Li (2)} : Fouillac et Michard (1981).

T_{δ¹⁸O(H2O-SO4)} : Mizutani and Rafter (1969).

Tabl. 12 - Estimation des températures en profondeur à partir des géothermomètres chimiques et isotopiques pour les eaux thermales des cirques de Salazie et de Cilaos.

Le géothermomètre K/Mg n'est pas applicable sur les eaux thermales des cirques car ce géothermomètre est plutôt basé sur une réaction d'équilibre entre minéraux alumino-silicatés et dans le cas présent, le magnésium en solution est contrôlé par une réaction d'équilibre de l'eau avec la dolomite désordonnée (voir diagramme $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ de la figure 37 et tableau 12).

Le géothermomètre Na/Li (Kharaka *et al.*, 1982) aboutit à des températures concordantes pour la plupart des eaux thermales de Salazie mais seulement pour deux eaux thermales de Cilaos (sources Aval du sentier de Taïbit et Benjouin). Comme le suggère la diminution d'un facteur dix de la concentration en lithium de l'eau thermale de la source ravine Olivette (SLZ13) entre le prélèvement de 1984 et celui de cette étude, il est possible que, sur cette source et les autres sources de Cilaos, du lithium précipite à l'émergence ou avant l'émergence avec des hydroxydes de fer ou des carbonates (fig. 42).

Le fait que seul le géothermomètre Na/Li de Kharaka *et al.* (1982), qui a été établi en utilisant les compositions chimiques des eaux de bassins sédimentaires pétroliers, soit utilisable montre l'importance du système carbonaté sur la composition chimique de ces eaux. Rappelons que l'autre géothermomètre Na/Li (Fouillac et Michard, 1981), qui donne de mauvais résultats dans le cas présent, a été créé à partir d'une étude statistique de données obtenues en milieu granitique et volcanique acide.

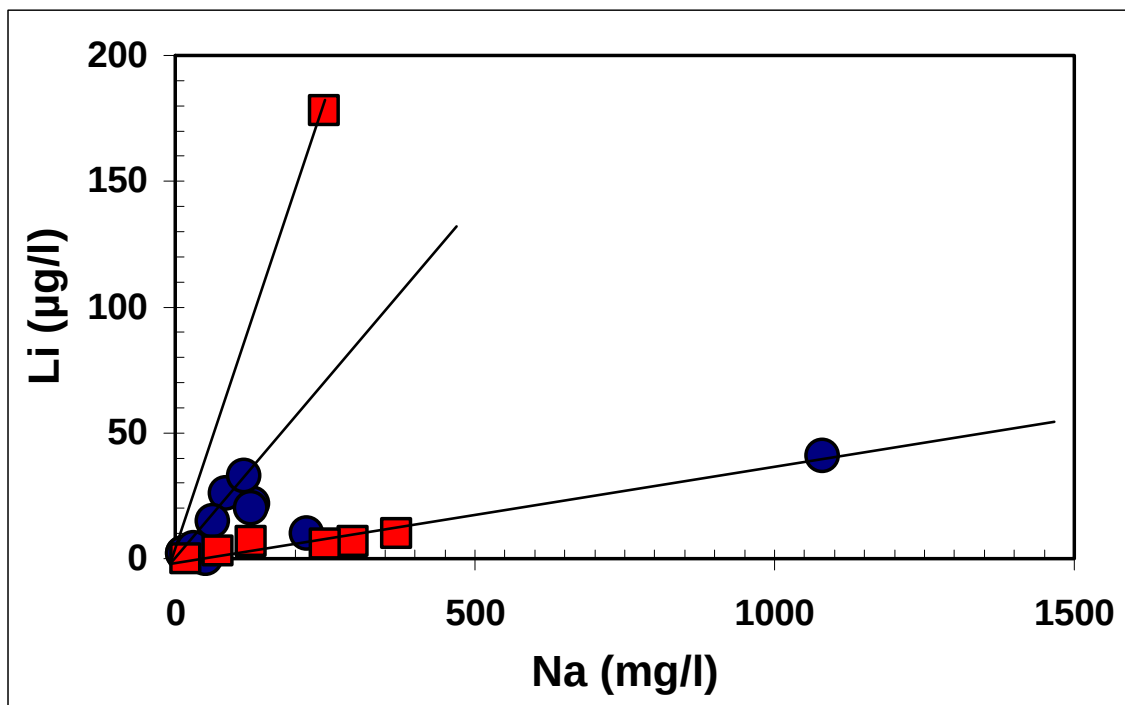


Fig. 42 - Diagramme binaire représentant les concentrations en lithium en fonction de celles en sodium ; analysées dans les eaux thermales des cirques de Salazie (ronds bleus) et de Cilaos (carrés rouges).

Le germanium, tout comme le bore, le lithium et le rubidium (Michard *et al.*, 1987) est caractéristique du réservoir profond et ne subit ultérieurement que peu de modifications. Il est pratiquement absent dans les eaux superficielles et n'est donc sensible qu'au phénomène de mélange avec celles-ci. Toutefois, seule l'eau de la source Jacqueline possède une valeur de concentration détectable en cet élément, qui est également associée à la seule valeur de concentration détectable en césium et aux concentrations les plus élevées en lithium et en rubidium de toutes les eaux thermales.

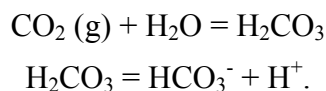
Le géothermomètre isotopique ^{18}O ($\text{H}_2\text{O}-\text{SO}_4$) donne des valeurs de température systématiquement plus élevées que celles estimées à partir de la plupart des autres géothermomètres (tabl. 12), ce qui ne révèle probablement pas un état d'équilibre isotopique. Par ailleurs, pour l'eau de la ravine Bachelier, qui est une eau superficielle froide, ce géothermomètre donne une température beaucoup trop élevée (211 °C). Des perturbations telles que des processus de mélange, des phénomènes d'oxydation avant l'émergence ou des réactions en déséquilibre peuvent affecter l'utilisation de ce géothermomètre.

Pour l'eau thermale de la source Aval du sentier de Taïbit, on peut remarquer que l'équilibre chimique et isotopique est pratiquement atteint car les températures obtenues sont pratiquement concordantes. Pour les eaux thermales des sources Irénée, Manès, Benjouin, Manouilh et ravine Olivette (SLZ13), on constate que la valeur de température estimée par ce géothermomètre, proche de 140 °C, est semblable à celle calculée en utilisant le géothermomètre à silice (quartz). Cette concordance est quelque peu troublante mais les résultats obtenus à partir des autres géothermomètres et les calculs de saturation vis-à-vis de la calcite à différentes températures semblent indiquer que ces eaux sont plutôt portées à des températures de l'ordre de 100 °C.

g) Modèle hydrogéochimique proposé

Les données géochimiques obtenues au cours de cette étude ont non seulement permis de valider certains des résultats antérieurs mais ont contribué aussi à mieux définir l'origine, la circulation et l'acquisition du chimisme des fluides. Dans l'ensemble, on peut conclure que les eaux thermales des cirques de Salazie et de Cilaos sont des eaux d'origine météorique, qui s'infiltrent, pour la plupart, dans la partie sommitale du piton des Neiges, et sont réchauffées, en profondeur, par des émanations gazeuses, essentiellement constituées de CO_2 d'origine magmatique, à des températures pouvant aller jusqu'à 120-130 °C et, en tout état de cause, à moins de 150 °C. Les températures profondes ainsi que les pressions partielles de CO_2 , sont relativement plus importantes dans le cirque de Cilaos que dans celui de Salazie.

Le CO_2 d'origine profonde se dissout dans les eaux thermales, les charge en bicarbonate et les rend relativement acides et agressives suivant les réactions :



Ceci a pour effet d'attaquer chimiquement les basaltes à des températures pouvant aller jusqu'à 120-130 °C. Néanmoins, les concentrations en calcium et en magnésium, en solution semblent être contrôlées, en profondeur, par la solubilité de minéraux tels que la calcite et la dolomite désordonnée. Il est fort probable que les concentrations en potassium, en strontium et en sodium (pour certaines eaux) soient aussi contrôlées, en profondeur, par des minéraux (smectites, par exemple). Ensuite, les rapports des concentrations de ces espèces sont peu modifiés au cours de la remontée et du refroidissement de ces eaux car les principaux mécanismes susceptibles d'affecter la composition chimique de ces eaux sont des processus de mélange avec des eaux superficielles beaucoup moins concentrées en ces éléments.

Pour la majorité des eaux thermales, l'essentiel des sulfates dissous est, très probablement, produit par une réaction d'oxydation d'une phase minérale sulfurée, faisant intervenir l'oxygène de l'eau comme oxydant.

La concentration en silice dissoute, quant à elle, contrôlée le plus souvent par la solubilité de la calcédoine ($T < 150-170$ °C), peut diminuer au cours de la remontée et du refroidissement des eaux thermales par précipitation ou dilution de ces eaux par des eaux plus superficielles. Ces processus de mélange avec des eaux superficielles semblent beaucoup plus fréquents dans le cirque de Salazie que dans celui de Cilaos, où ils sont très peu nombreux. Ceci s'explique assez facilement si on compare le régime de pluviosité de chacun des cirques, étant donné que les précipitations dans le cirque de Cilaos sont moins nombreuses que dans celui de Salazie.

Après un long circuit, depuis son infiltration (au moins, plus de 50 ans, d'après les résultats des analyses en tritium), l'eau thermique remonte à la faveur de discontinuités structurales en se refroidissant et en dégageant du CO_2 peu avant ou à l'émergence des sources. Ce dégagement de CO_2 , qui fait remonter le pH de la solution, ainsi que le changement d'état d'oxydo-réduction de l'eau, peuvent provoquer la précipitation de calcite, smectites et oxy-hydroxydes de fer, comme cela est observé à l'émergence de nombreuses sources thermales. Dans le cas de Salazie, des eaux superficielles peuvent venir se mélanger avec des eaux thermales au cours de leur remontée.

3.2. PROFILS DE MESURES DE TENEURS EN GAZ DANS LES SOLS

3.2.1. Intérêt de la méthodologie utilisée

L'analyse dans les sols de certains gaz libres tels que l'oxygène, l'azote, le dioxyde de carbone, l'argon, l'hélium et le radon, permet de détecter des anomalies de fuite associées à des discontinuités structurales dans la croûte terrestre (failles, points d'émissions magmatiques et de fumerolles) et à des flux d'énergie. Cette méthode présente donc un intérêt tout particulier pour la prospection géothermique. Quelques-unes de ces anomalies coïncident (enrichissement en He, appauvrissement en O_2 par rapport à la composition atmosphérique) tandis que d'autres, en raison de la présence de nappes phréatiques et de la plus grande solubilité de certains gaz dans l'eau, peuvent être décalées par rapport aux premières (enrichissement en CO_2 par exemple).

Le radon ne diffusant pas latéralement, contrairement à l'hélium et surtout au dioxyde de carbone, s'exprime en surface par des anomalies sous forme de bandes très étroites (Baubron et Sabroux, 1984). Ce gaz dont l'isotope 222 est le plus stable (période de 3,8 jours) et est celui que l'on mesure, ne doit sa grande mobilité qu'à celle des fluides qui le transportent. Il constitue, par conséquent, un bon indicateur d'un flux correspondant à des circulations d'eaux actives.

Le dioxyde carbone (CO_2) est un gaz ubiquiste puisque ce gaz est signalé sur tous les champs géothermiques connus et, d'une manière générale, dans les fumerolles de toutes les zones volcaniques du monde, quelle que soit, d'ailleurs, la température des émanations gazeuses (Truesdell *et al.*, 1983).

La mesure des différents gaz contenus dans les sols est un outil précieux pour la recherche d'eaux thermales, riches en gaz. Elle permet de tracer parfaitement le flux des gaz libérés par ces eaux qui subissent, au cours de leur remontée vers la surface, une baisse de pression. Quand la pression est inférieure au « point de bulle », il y a séparation des phases (eau et gaz) et les gaz, ainsi libérés, migrent dans le proche sous-sol. Dans le contexte volcanique de La Réunion, ces gaz sont essentiellement constitués de CO_2 .

Dans les sols, la production de CO_2 d'origine biogénique se fait essentiellement au niveau des racines et lors de la décomposition de la matière organique. Ce CO_2 se rencontre dans la partie très superficielle du sol (15 à 20 cm) ; les concentrations sont variables selon la saison et la nature du sol mais dépassent rarement 5 % en volume. L'air atmosphérique ne possède que de très faibles teneurs en CO_2 (0,034 % environ).

Ainsi, en utilisant une technique de prélèvement qui puisse faire abstraction du CO_2 superficiel d'origine biogénique (ann. 6), on peut détecter les émanations de CO_2 associées à la présence d'eaux thermales ou de discontinuités structurales profondes.

3.2.2. campagne de mesures (21 juin - 5 juillet 2001)

a) Sélection des profils de mesures

Le 21 juin 2001, une réunion tenue au Conseil régional de La Réunion avec A. Gibeaux (Conseil régional) et B. Robineau (Université de La Réunion) a permis de sélectionner les différentes zones d'exploration en utilisant, pour les cirques de Salazie et de Cilaos, certains des résultats des travaux de géologie présentés dans le chapitre 2.

Au cours de cette campagne de mesures, onze profils ont été réalisés sur cinq grandes zones, à savoir : le cirque de Salazie, la plaine des Sables associée au volcan du piton de La Fournaise, les plaines des Palmistes et des Cafres et enfin, le cirque de Cilaos. Par rapport aux objectifs initiaux et compte tenu des premiers résultats, il a été décidé de faire l'impasse sur les mesures dans le cratère Dolomieu (un jour pour quelques points de référence) afin d'effectuer plus de mesures sur les plaines des Palmistes et des Cafres. La longueur des profils et le pas de mesure varient suivant les zones étudiées.

Les onze profils réalisés sont donc :

- profil 1 : site SLZ1 - Mare à Vieille Place	14 points,
- profil 2 : site Anciens Thermes d'Hell-Bourg	12 points,
- profil 3 : site ravine Olivette - rivière du Mât	13 points,
- profil 4 : site camp Pierrot - Mare à Poule d'eau	10 points,
- profil 5 : site Trou Blanc	11 points,
- profil 6 : site plaine des Sables - plaine des Remparts - Nez de Bœuf	29 points,
- profil 7 : site plaine des Palmistes	16 points,
- profil 8 : site plaine des Cafres	12 points,
- profil 9 : site route d'Ilet à Cordes	21 points,
- profil 10 : site Bras Rouge	10 points,
- profil 11 : site Anciens Thermes de Cilaos	12 points.

Les plans de situation des profils et les différents points de mesure sont reportés dans l'annexe 7.

b) Protocoles utilisés et analyses

Les différents protocoles de prélèvements et de mesures de gaz sont rapidement présentés dans l'annexe 6. Afin de conserver le spectromètre ALCATEL en bon état et dans l'impossibilité de l'amener sur place, l'hélium a été analysé dans les différents gîtes d'hébergement, au retour des campagnes de mesures de CO₂, CH₄ et O₂. L'hélium et le radon n'ont pas été analysés sur tous les points de mesure. Le choix de réalisation des analyses de ces deux gaz a souvent été guidé par les résultats obtenus sur site en CO₂.

Conjointement à ces analyses, les gaz ont été prélevés sur quatre points de mesure dans des ampoules de verre, rapportées à Orléans, pour confirmer les résultats des analyses chimiques faites sur place et pour déterminer les teneurs en carbone-13, qui permettent, bien souvent, de déterminer l'origine du CO₂ (origine biogénique, magmatique ou dissolution de carbonates ?).

Les analyses chimiques des gaz ont été réalisées dans les laboratoires du BRGM par chromatographie en phase gazeuse avec les mêmes précisions analytiques que définies dans le chapitre 3.1.2. Les analyses isotopiques de carbone-13 ont également été effectuées dans les laboratoires du BRGM par spectrométrie de masse. L'incertitude analytique absolue est de 0,1 ‰. Pour chaque échantillon de gaz, une prise d'essai a été réalisée par détente dans un volume fini d'une ligne de purification et d'extraction des gaz. L'aliquote a été piégée puis purifiée avant son transfert dans un tube d'analyse. Avant l'analyse, un contrôle du spectre de masse de chaque échantillon a été effectué. Les gaz sont propres (CO₂), excepté pour l'échantillon du profil n° 3 (rivière Mât), qui présente quelques impuretés non identifiées. Les valeurs isotopiques sont déterminées par un gaz de référence CO₂ provenant d'un carbonate ($\delta^{13}\text{C} = 2,05 \text{ ‰}$ vs PDB).

Les données brutes obtenues au cours de cette campagne ainsi que les résultats des analyses complémentaires sont reportés dans l'annexe 8.

3.2.3. Interprétation des résultats et discussion

L'examen approfondi des tableaux de l'annexe 8 ainsi que celui des diagrammes CO₂-Rn, CO₂-He, CO₂-CH₄ et Rn-He de la figure 43, dans lesquels tous les points de mesure des onze profils ont été reportés, permettent de mettre en évidence que :

- les sites Anciens Thermes d'Hell-Bourg, ravine Olivette, camp Pierrot, Trou Blanc, plaine des Sables et rivière Bras Rouge ne montrent pratiquement aucun indice majeur de fuites d'origine profonde ;
- dans l'ensemble, peu d'anomalies en hélium ont été détectées et par conséquent, les indices de fuite d'origine profonde semblent être relativement rares. Seuls quelques points du profil n° 9, qui montrent également les anomalies les plus importantes en CO₂ et en radon, possèdent des teneurs en hélium très supérieures à celle de l'atmosphère (5,24 ppm). Dans le profil n° 1, sur le site de l'ancien forage réalisé par le BRGM, dans certaines zones de la rivière du Mât (profil n° 3) et sur le site des thermes de Cilaos (profil n° 11), quelques valeurs légèrement anormales en hélium, en CO₂ et en radon sont également observées ;
- une anomalie de méthane, dans le profil n° 7 (plaine des Palmistes), est associée, aux alentours, à des teneurs en CO₂ et en radon relativement importantes ;
- le profil n° 9 (plaine des Cafres), où des teneurs élevées en radon sont systématiquement observées, mérite une attention toute particulière ;
- les sols autour des sources thermales n'indiquent pas d'anomalies particulières (sources thermales de la ravine Olivette, par exemple). Ceci est probablement causé par la fuite préférentielle des gaz par l'émergence des sources thermales.

a) Principales anomalies de CO₂ et He : profil n° 9 (route d'Ilet à Cordes)

Le résultat principal de cette étude est la mise en évidence d'une zone très anormale, bien localisée (zone fracturée avec accumulation de sills basaltiques), qui représente vraisemblablement une fuite importante associée à une discontinuité structurale relativement profonde. Cette zone fait partie du profil n° 9 (route d'Ilet à Cordes, dans le cirque de Cilaos ; ann. 7).

Les concentrations en He y atteignent 6,26 et 7,75 ppm et sont de l'ordre des anomalies observées dans les sols de cratères volcaniques sub-actifs (10 ppm par exemple ; Soufrière, en Guadeloupe, ou Vulcano, en Italie (Baubron *et al.*, 1990). Les anomalies les plus importantes en CO₂ (17, 21 et 31 %) et celles parmi les plus élevées en radon (240 et 605 pCi/l) y ont également été détectées. Les concentrations en He mesurées sur ce profil ont été reportées sur la figure 44.

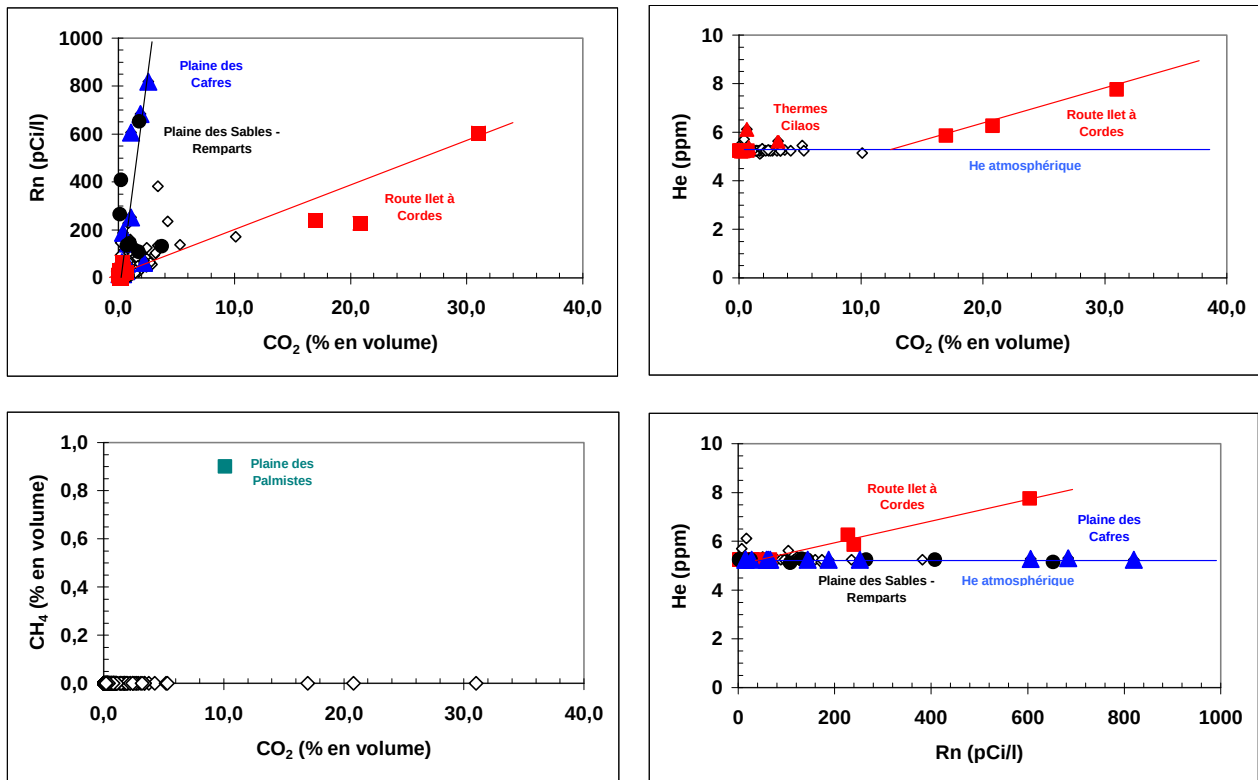


Fig. 43 - Diagrammes binaires représentant les teneurs en hélium (He), radon (Rn) et méthane (CH₄) en fonction de celles en dioxyde de carbone (CO₂) et diagramme binaire représentant les teneurs en hélium en fonction de celles en radon, mesurées sur les échantillons de gaz dans les sols au cours de la campagne réalisée au mois de juin-juillet 2001 dans différentes zones de l'île de La Réunion. Les teneurs en CO₂ et CH₄ sont exprimées en % de volume, les teneurs en He en ppm et les teneurs en Rn en pCi/l.

Un prélèvement de gaz en ampoule a permis de confirmer les résultats des mesures sur site et de déterminer la signature isotopique en carbone-13 du CO₂ (ann. 8). La valeur obtenue (-1,2 ‰) est relativement élevée par rapport à une origine purement magmatique (de l'ordre de -5 à -4 ‰ dans l'île de La Réunion mais pouvant être comprise entre -8,6 et -2,3 ‰, d'après Marty *et al.*, 1993). Cette valeur pourrait résulter d'un mélange entre des émanations de CO₂ d'origine magmatique et de CO₂ provenant de décarbonatation de carbonates marins ($\delta^{13}\text{C} \approx 0\text{-}2 \text{ ‰}$).

Pouvoir retrouver des formations analogues à celle du profil n° 9 dans l'île permettrait de savoir si ce type de structures géologiques est toujours lié à des anomalies de gaz.

b) Anomalies de CO₂ et de CH₄ : profil n° 7 (plaine des Palmistes)

Dans le profil n° 7, plaine des Palmistes, sur la bordure sud du piton des Neiges, une anomalie de méthane, liée à un taux relativement élevé de CO₂ et de radon ainsi qu'à

une baisse considérable d'oxygène, a été mise en évidence, près d'un tunnel en basalte. Tout autour de cette anomalie, des taux significatifs de CO₂ et de radon semblent confirmer l'intérêt de cette zone (ann. 8), qui est située entre les deux massifs volcaniques (piton des Neiges - piton de La Fournaise).

Les résultats de l'analyse chimique des gaz effectuée dans les laboratoires du BRGM confirment bien les mesures réalisées sur site (ann. 8) et suggèrent un apport supplémentaire d'azote par rapport à la teneur en oxygène atmosphérique, qui reste et qui a été analysée.

La valeur isotopique en carbone-13 (-17,1 ‰ ; ann. 8), mesurée sur le carbone du CO₂, semble témoigner d'une origine mixte de cette espèce, à la fois biogénique ($\delta^{13}\text{C} < -15 \text{ ‰}$; Faure, 1986) et magmatique ($-8,6 \text{ ‰} < \delta^{13}\text{C} < -2,3 \text{ ‰}$).

À titre d'exemple, Nicolini *et al.* (1991) ont trouvé une valeur de $\delta^{13}\text{C} = -15,4 \text{ ‰}$ pour la minéralisation de la matière organique des sols de la prairie prélevés à 1 800 m d'altitude dans le bassin versant de la rivière de l'est et une valeur de $\delta^{13}\text{C} = -26,1 \text{ ‰}$ pour celle des sols de la forêt. Dans le cas présent, le pourcentage de carbone d'origine biogénique serait prédominant, ce qui diminue l'intérêt du site. Dans ce contexte, aucun géothermomètre à gaz n'a été appliqué. Néanmoins, pour valider ce résultat, des mesures de carbone-13 supplémentaires seraient nécessaires sur ce point et les points voisins, qui indiquaient des teneurs anormales en CO₂ et en radon.

c) Anomalies de radon : profil n° 8 (plaine des Cafres)

Les teneurs en radon les plus élevées (jusqu'à 820 pCi/l) ont été déterminées dans le profil n° 8 (plaine des Cafres). Ces valeurs, qui sont comparables à celles trouvées dans certaines zones de la plaine du Lamentin, en Martinique (Chovelon et Marty, 1985) ou au pied du volcan Vulcano (Baubron *et al.*, 1990), ne sont pas associées à des teneurs spécialement fortes en CO₂ ou en He (fig. 43). Il se pourrait que des nappes d'eaux superficielles masquent les teneurs élevées en CO₂ et en He par dispersion de ces gaz (diffusion latérale). Là encore, cette zone est située entre les deux massifs volcaniques (piton des Neiges - piton de La Fournaise) et mérite une attention toute particulière.

d) Anomalies de CO₂

Des prélèvements de gaz pour mesure du carbone-13 ont été effectués sur deux points où les teneurs en CO₂ étaient relativement élevées pour connaître l'origine de ce gaz (ann. 8). L'un des points fait partie du profil n° 3 et est situé dans le lit de la rivière du Mât, près du pont de Singe. Le prélèvement a été fait en dessous d'une couche de sable. L'autre point appartient au profil n° 6 et est situé sur un chemin de terre, près de la route, au niveau du point de vue de la rivière des Remparts.

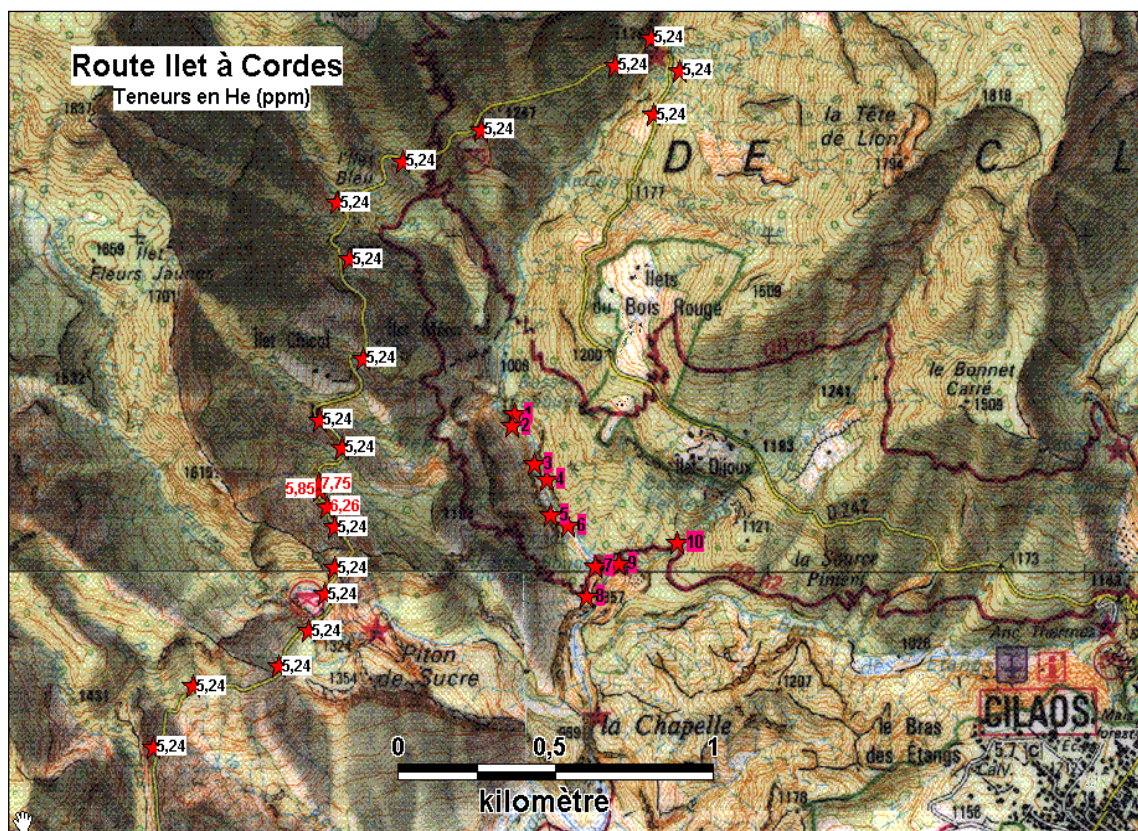
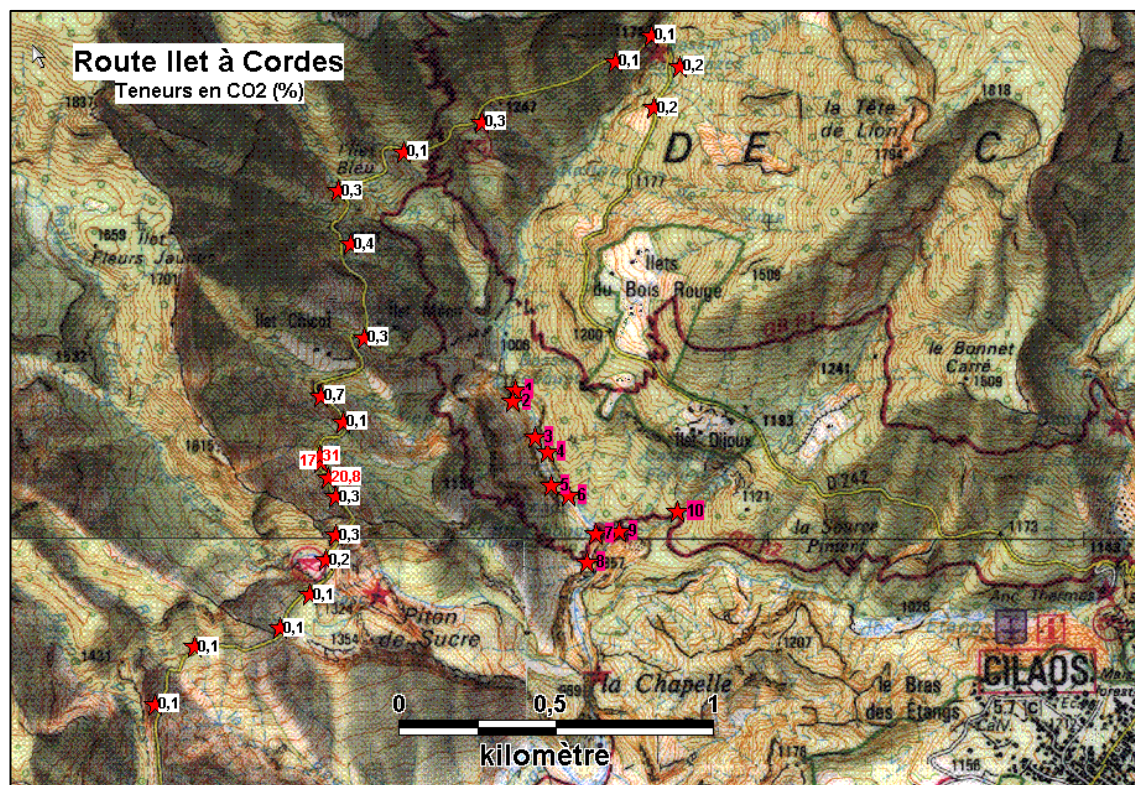


Fig. 44 - Mesures des teneurs en CO₂ et en He dans les gaz dans les sols obtenues au cours de la réalisation du profil n° 9 (route d'Ilet à Cordes).

Pour le premier point, où une teneur en CO₂ de 2,7 % avait été déterminée, la valeur isotopique du carbone-13 (-22,7 ‰) indique que le CO₂ est essentiellement d'origine biogénique. Pour le second point, qui affichait une teneur en CO₂ de 3,8 %, la valeur en carbone-13 mesurée (-13,1 ‰) suggère une origine mixte biogénique et magmatique avec, cependant, cette fois-ci, une prédominance de l'origine magmatique.

e) Recommandations

Les résultats obtenus sur toutes ces zones devront être confrontés aux données issues des études de géophysique afin d'examiner si des convergences existent et peuvent mettre en évidence des zones potentiellement favorables à la géothermie. Des mesures supplémentaires (davantage d'analyses isotopiques en carbone-13, par exemple) et des profils plus resserrés, perpendiculaires et avec un quadrillage plus important, mériteraient d'être réalisés sur des sites tels que route Ilet à Cordes, plaine des Palmistes et plaine des Cafres.

4. Conclusion

Les travaux de géologie et de géochimie réalisés au cours de cette étude ont non seulement permis de confirmer certaines données obtenues dans le passé mais ont contribué à proposer un modèle conceptuel de fonctionnement du système hydrothermal, situé sous le piton des Neiges.

La convergence des observations faites de part et d'autre de ce volcan incite à rechercher un modèle général pour l'origine des fluides hydrothermaux dans les cirques rendant compte de l'association spatiale entre corps intrusifs de grande dimension et émergences thermo-minérales et des caractéristiques géochimiques de ces fluides.

La figure 45 présente une section verticale nord-sud à travers les cirques de Salazie et Cilaos, qui tente de rendre compte des observations et d'illustrer un système hydrothermal superficiel de moyenne température à l'origine des fluides rencontrés en surface.

La géométrie des corps intrusifs des cirques de Salazie et de Cilaos, représentée sur cette figure, a été volontairement simplifiée et ne reflète pas la complexité de ces intrusions. Néanmoins, cette représentation est suffisante, dans un premier temps, pour bâtir un modèle, qui tente d'expliquer l'origine et la circulation des fluides hydrothermaux dans les cirques.

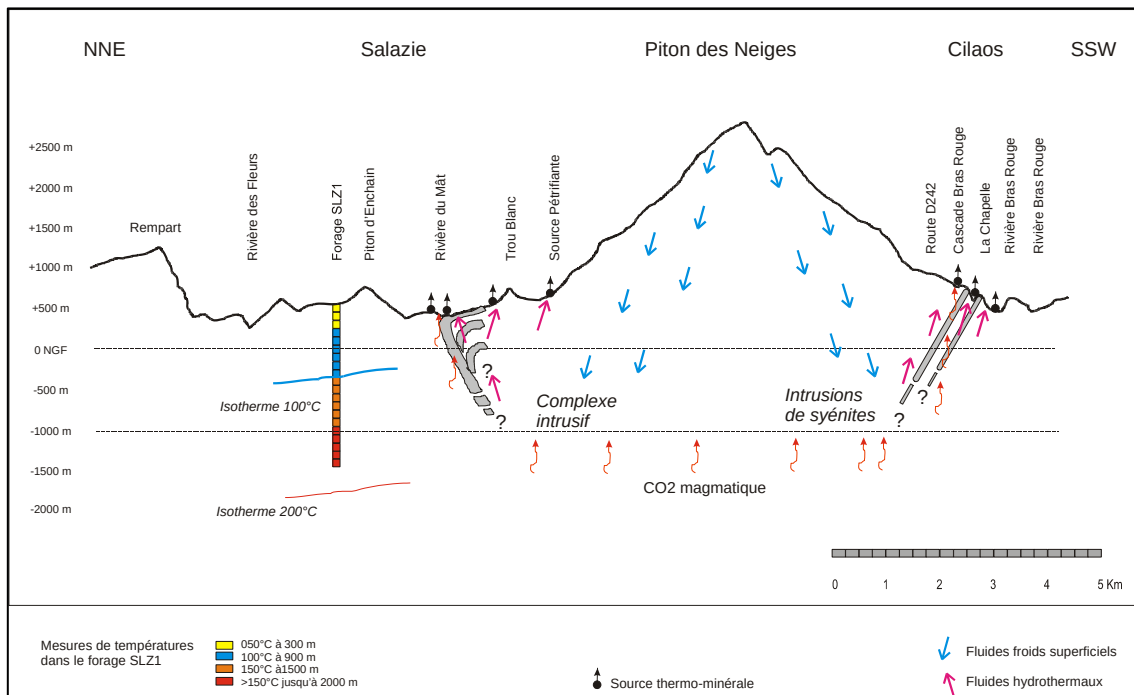


Fig. 45 - Section verticale nord-sud à travers les cirques de Salazie et Cilaos, qui illustre un système hydrothermal superficiel de moyenne température à partir des observations effectuées au cours de cette étude.

Les données géochimiques obtenues au cours de cette étude ont permis de mieux définir l'origine, la circulation et l'acquisition du chimisme des fluides. Ainsi, d'après les valeurs en deutérium et en oxygène-18 ainsi que le gradient isotopique d'altitude moyen de -0,30 m/100 m, établi pour l'oxygène-18, on peut conclure que les eaux thermales des cirques de Salazie et de Cilaos sont des eaux d'origine météorique, qui s'infiltrent, pour la plupart, dans la partie sommitale du piton des Neiges. L'absence d'enrichissement net en oxygène-18 observé sur les eaux thermales ne suggère pas d'échanges à haute température entre ces eaux et les basaltes.

D'après des calculs d'indices de saturation des eaux vis-à-vis de certains minéraux réalisés au moyen du code géochimique EQ3NR et les résultats obtenus à l'aide des géothermomètres chimiques, ces eaux seraient, ensuite, réchauffées, en profondeur, par des émanations gazeuses, essentiellement constituées de CO₂ d'origine magmatique à des températures pouvant aller jusqu'à 120-130 °C mais en tout état de cause, à moins de 150 °C.

Les températures profondes estimées, ainsi que les pressions partielles de CO₂ minimales calculées à l'émergence des sources, sont relativement plus importantes dans le cirque de Cilaos (T de l'ordre de 70 à 130 °C ; P_{CO₂} de 0,4 à 7,6 bar) que dans celui de Salazie (T de l'ordre de 40 à 100 °C ; P_{CO₂} de 12,2 mbar à 2,1 bar). Le léger enrichissement en oxygène-18 observé pour les eaux de Cilaos par rapport à celles de Salazie ainsi que la signature isotopique en strontium plus proche de celle des basaltes pour les eaux de Cilaos (0,70420) semblent confirmer ces différences. La sous-saturation des eaux thermales, estimées comme les plus chaudes en profondeur (aval Sentier Taïbit, Irénée, ravine Olivette), vis-à-vis de minéraux comme l'albite, le feldspath potassique et la muscovite, et leur saturation avec les smectites (minéraux argileux), tendent plutôt à confirmer les valeurs relativement faibles trouvées pour les températures profondes.

Le forage de Salazie SLZ1 montre que les conditions de température en profondeur suggérées par la composition chimique des eaux thermales des cirques (120-130 °C) peuvent être atteintes vers 1 000-1 500 m de profondeur environ, dans l'hypothèse d'un régime thermique conductif dominant. Le système hydrothermal à l'origine des eaux thermales serait donc relativement superficiel. Il semble donc cohérent de proposer que les corps intrusifs sont suffisamment enracinés en profondeur pour drainer les fluides vers la surface, expliquant ainsi le positionnement des sources à leur contact ou à proximité.

Après un long temps de circulation, depuis son infiltration (au moins, plus de 50 ans, d'après les analyses de tritium), l'eau thermique remonte à la faveur de discontinuités structurales en se refroidissant et en dégageant du CO₂ peu avant ou à l'émergence des sources. Ce dégagement de CO₂, qui fait remonter le pH de la solution, ainsi que le changement d'état d'oxydo-réduction de l'eau, peuvent provoquer la précipitation de calcite, smectites et oxy-hydroxydes de fer, comme cela est observé à l'émergence de nombreuses sources thermales.

Les processus de mélange avec des eaux superficielles semblent beaucoup plus fréquents dans le cirque de Salazie (surtout au niveau de la rivière du Mât) que dans celui de Cilaos, où ils sont très peu nombreux. Ceci s'explique assez facilement si on compare le régime de pluviosité de chacun des cirques, étant donné que les précipitations dans le cirque de Cilaos sont moins nombreuses que dans celui de Salazie.

Ce modèle ne permet malheureusement pas de préjuger de l'importance de la perméabilité. Elle est apparemment plus élevée en bordure et au sein de la structure caldérique supposée que dans les cirques, mais il est difficile de conclure à ce stade qu'elle est suffisante pour le développement d'un réservoir géothermique. Dans le puits SLZ1 situé en dehors de la structure caldérique, la perméabilité est apparue très faible.

Les indices les plus favorables (température des fluides, cartographie des gaz, géométrie des corps intrusifs) sont observés dans le secteur de Bras Rouge à Cilaos. Ceci est probablement à mettre en relation avec le fait que les dernières manifestations volcaniques du piton des Neiges sont localisées dans ce secteur du Rond de Bras Rouge, Cilaos, avec des remontées de gaz profonds chauds et un gradient thermique conductif plus élevés.

Quant à la possibilité de trouver un système hydrothermal plus profond et à haute température ($> 200\text{ }^{\circ}\text{C}$), la principale inconnue réside dans la prolongation vers le bas de ce système hydrothermal superficiel. D'après les informations du forage SLZ1, l'isotherme $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ se situerait vers 2 300 m de profondeur, en considérant toujours un régime thermique conductif. Aucun indice de fluide minéralisé et équilibré sous ces conditions de température élevées n'a été rencontré. L'enracinement des corps intrusifs, évoqué pour expliquer la remontée des fluides du système hydrothermal superficiel n'est pas contraint à cette profondeur. L'absence de tectonique récente de grande ampleur et permettant de réactiver ou de créer des drains perméables en profondeur est sans nul doute aussi un facteur limitant pour la perméabilité.

En conclusion, la présence d'un système hydrothermal superficiel de moyenne température, localisé au sein de la caldeira récente supposée du piton des Neiges apparaît comme probable et cohérente avec les données géologiques et géochimiques récoltées au cours de cette étude. Par contre, la présence d'un système plus profond, combinant à la fois des conditions de température élevée ($> 200\text{ }^{\circ}\text{C}$) et de perméabilité requises pour le développement d'un réservoir géothermique haute enthalpie n'est pas étayée. Seule l'existence de conditions de température élevées semble être établie.

En complément de l'étude en géologie et en géochimie des eaux des cirques de Salazie et de Cilaos, onze profils de mesure de gaz ont été réalisés sur cinq grandes zones de l'île de La Réunion, à savoir : le cirque de Salazie, la plaine des Sables associée au volcan du piton de La Fournaise, les plaines des Palmistes et des Cafres et le cirque de Cilaos. Les résultats obtenus sur ces profils montrent que les seules anomalies importantes d'hélium et les anomalies les plus élevées en CO_2 et en radon ont été détectées dans la zone de Cilaos (route Ilet à Cordes). Néanmoins, quelques indices trouvés dans la plaine des Palmistes (anomalies en CO_2 et CH_4) et dans la plaine des Cafres (anomalies en radon) suggèrent de poursuivre des travaux d'exploration sur ces zones, qui sont situées entre les deux édifices volcaniques.

5. Les perspectives de développement de la géothermie à la Réunion et recommandations

5.1. DANS LES CIRQUES DU PITON DES NEIGES

Ces travaux ont permis de mettre en évidence un système hydrothermal superficiel de moyenne température à l'intérieur de la structure caldeirique récente supposée du massif du piton des Neiges, en particulier, au niveau des corps intrusifs de grande dimension, qui lui sont associés. Les zones d'intérêt correspondent à la partie sud des cirques de Salazie (rivière du Mât) et à la partie nord du cirque de Cilaos (Bras Rouge). Les indices relevés à Cilaos (température des fluides, géométrie et dimension des corps intrusifs, site des dernières manifestations magmatiques) suggèrent que le système hydrothermal superficiel est plus développé dans ce secteur méridional de la caldeira.

La réalisation de forages d'exploration dans ces zones d'intérêt avec un objectif de profondeur de l'ordre de 1 500 m permettrait de vérifier l'existence du système hydrothermal superficiel de moyenne température proposé et d'évaluer les conditions de perméabilité en profondeur.

5.2. DANS LES AUTRES ENTITÉS GÉOLOGIQUES DE L'ÎLE DE LA RÉUNION

Le programme d'exploration géothermique, réalisé par le BRGM et dont les résultats font l'objet de ce rapport, a été focalisé sur le massif du piton des Neiges, à l'exception d'une campagne de réalisation de profils de mesures des gaz dans le sol, dans les plaines des Sables, des Palmistes et des Cafres.

L'étape suivante proposée par le BRGM dans le cadre du projet « Géothermie Réunion » du Conseil régional serait d'étendre l'exploration géothermique réalisée au piton des Neiges aux deux autres entités géologiques de l'île de La Réunion, à savoir la région centrale avec les plaines des Cafres et des Palmistes et le massif du piton de la Fournaise. Une démarche identique combinant une approche géologique et une approche géochimique permettrait d'actualiser les connaissances au niveau de ces deux entités et leurs potentialités géothermiques. Bien évidemment, une approche géophysique, dans un contexte où les indices de surface d'une zone potentiellement favorable à la géothermie sont rares, est indispensable.

Une recherche et une caractérisation géochimique des eaux des sources sous-marines mises en évidence en bordure côtière par thermographie infra-rouge et sur images SPOT (Violette *et al.*, 1997) est également proposée. En principe, les eaux de ces sources sont considérées comme plutôt froides mais à notre connaissance, aucun prélèvement direct n'y a été réalisé.

Bibliographie

- Albarède F. and Tamagnan V. (1988) - Modelling the recent geochemical evolution of the piton de La Fournaise Volcano, Réunion Island, 1931-1986. *J. Petrol.*, 29, 997-1030.
- Arnorsson S. (1975) - Application of the silica geothermometer in low temperature hydrothermal areas in Iceland. *Amer. J. Sci.*, 275, 763-784.
- Bachelery P., Mairine P. (1990) - Evolution volcano-structurale du piton de la Fournaise depuis 0,53 MA. In: Le volcanisme de la Réunion : monographie, J.F. Lénat (Ed.). Centre de Recherches Volcanologiques, Clermont-Ferrand, p. 213-242.
- Bachelery P., Lenat J.F. (1993) - Le piton de la Fournaise. *Mém. Soc. géol. Fr.*, vol. 163, p. 221-229.
- Baubron J.C. et Sabroux J.C. (1984) - Analyses des gaz dans les sols sur les zones de Bouillante et de Moscou (Guadeloupe). Rapport BRGM n° 84 SGN 400 GTH, 94 p.
- Baubron J.C., Allard P. and Toutain J.P. (1990) - Diffuse volcanic emissions of carbon dioxide from Vulcano Island, Italy. *Nature*, vol. 344, p. 51-53.
- Billard G. (1974) - Carte géologique de la France. La Réunion. BRGM, Orléans, 40 p., 4 feuilles 1/50 000.
- BRGM (1966) - Les sources thermominérales de Cilaos : étude géologique et étude des principales caractéristiques (débit, température et résistivité des captages existants). Rapport BRGM n° TAN 66 - A/27, 30 p.
- BRGM (1968a) - sources thermominérales de Cilaos - Travaux de reconnaissance. Rapport BRGM n° 68 TAN- 30C, 14 p.
- BRGM (1968b) - sources thermominérales de Cilaos - Travaux de reconnaissance par puits et galeries en vue de leur recaptage. Rapport BRGM n° 68 TAN - 9D, 28 p.
- BRGM (1994) - Hydrochimie des eaux souterraines de l'île de la Réunion. Eaux de source et eaux de nappes. Bilan et synthèse 1994. Rapport BRGM n° R38188 REU SGN 94, 74 p.
- Chevalier L. (1979) - Structures et évolution du volcan piton des Neiges, île de la Réunion : leurs relations avec les structures du bassin des Mascareignes, océan Indien occidental. Thèse 3^e cycle, Grenoble.

- Chovelon P. et Marty B. (1985) - Analyses des gaz dans les sols sur les zones du Lamentin et du Morne Rouge - Montagne Pelée (Martinique). Rapport BRGM n° 85 SGN 413 GTH, 58 p.
- Daesslé M. et Duchamps J.M. (1989) - Hydrochimie des eaux souterraines de l'île de La Réunion : eaux de sources et eaux de forages. Rapport BRGM 89 REU 22, 56 p.
- D'Amore F. and Panichi C. (1980) - Evaluation of deep temperatures of hydrothermal systems by a new gas-geothermometer. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44, p. 549-556.
- Demange J., Chovelon P., Puvilland P. (1989) - Geothermal model of the Salazie cirque (Réunion Island) : Volcanic and structural implications, *J. Volcano. Geotherm. Res.*, 36, p. 153-176.
- Duffield W.A., Stieltjes L., Varet J. (1982) - Huge landslide blocks in the growth of piton de la Fournaise, La Réunion, and Kilauea Volcano, Hawaii. *J. Volc. Geotherm. Res.*, 12, p. 147-160.
- Faure G. (1986) - Sulfur. *In* : Principles of isotope geology, Ed. John Wiley and Sons, 2nd Edition, printed in USA, 589 p.
- Fouillac C. and Michard G. (1981) - Sodium/lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoirs. *Geothermics*, 10, 55-70.
- Fournier R.O. (1979) - A revised equation for the Na/K geothermometer. *Geoth. Res. Council Trans.*, 3, p. 221-224.
- Fournier R.O. and Potter R.W. (1979) - Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, p. 1543-1550.
- Fournier R.O. and Rowe J.J. (1966) - Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells. *Amer. J. Sci.*, p. 264-685-697.
- Fournier R.O. and Truesdell A.H. (1973) - An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, p. 1255-1275.
- Giggenbach W.F. (1988) - Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, p. 2749-2765.
- Giggenbach W.F. and Goguel R.L. (1989) - Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas discharges. Fourth Edition. Report CD2401, Chemistry Division, DSIR, New Zealand.
- Giggenbach W.F. (1991) - Chemical techniques in geothermal exploration. *In*: Applications of geochemistry in geothermal reservoir development by F. D'Amore, p. 119-144.

- Helgesen H.C., Delany J.M., Nesbitt H.W., Bird D.K. (1978) - Summary and critique of the thermodynamic properties of rock-forming minerals. *Amer. Jour. Sci.*, 278A.
- Iundt F., Mauroux B., Barrera L., Cruchet M., Martignoni P. et Stieltjes L. (1992) - Etude des sources thermominérales de Cilaos. Rapport BRGM n° R35833, 60 p.
- Iundt F. et Mauroux B. (1992) - Etude des sources thermominérales de Cilaos. Analyses isotopiques des eaux. Rapport BRGM n° R36185 REU 4S 92 (92 REU 46), 5 p.
- Kharaka Y.K., Lico M.S. and Lax L.M. (1982) - Chemical geothermometers applied to formation waters, Gulf of Mexico and California basins. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull*, 66, 588.
- Kharaka Y.K. and Mariner R.H. (1989) - Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins. *In*: Naeser, N.D. and McCulloch, T.H. (eds), Thermal history of sedimentary basins: methods and case histories. Springer-Verlag, New York, p. 99-117.
- Lopoukhine M. and Stieltjes L. (1978) - Evaluation du potentiel géothermique de l'île de la Réunion. 1ère phase exploratoire : Géologie et géochimie des eaux. Rapport BRGM 78 SGN 467 GTH, 57 p.
- Louvat P. and Allègre C.J. (1997) - Present denudation rates on the island of Réunion determined by river geochemistry : Basalt weathering and mass budget between chemical and mechanical erosions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, n° 17, p. 3645-3699.
- Lénat J.F., Bachelery P. (1990) - Structure et fonctionnement de la zone centrale du piton de la Fournaise, *In*: Le volcanisme de la Réunion : monographie, J.F. Lénat (Ed.). Centre de Recherches Volcanologiques, Clermont-Ferrand, p. 257-296.
- Lénat J.F., Fitterman D., Jackson D.B., Labazuy P. (2000) - Geoelectrical structure of the central zone of piton de la Fournaise volcano (Réunion). *Bull. Volcanol.*, V. 62, p. 75-89.
- Maillot E. (1999) - Les systèmes intrusifs des volcans boucliers océaniques (Ile de La Réunion) : approche structurale et expérimentale. Thèse de Doctorat, Université de La Réunion.
- Marini L. (1987) - Geochemistry of North Ghoubbat-Asal Region. Doc. Geothermica Italiana, 28 p.
- Marty B., Meynier V., Nicolini E., Griesshaber E. and Toutain J.P. (1993) - Geochemistry of gas emanations: a case study of Réunion Hot Spot, Indian Ocean. *Appl. Geochem.*, 8, p. 141-152.
- Michard G. (1979) - Géothermomètres chimiques. *Bull. BRGM* (2) III, n° 2, p. 183-189.

- Michard G. (1989) - Equilibres chimiques dans les eaux naturelles. Publisud, 357 p.
- Michard G. (1990) - Behaviour of major elements and some trace elements (Li, Rb, Cs, Fe, Mn, W, F) in deep hot waters from granitic areas. *Chem. Geol.* 89, p. 117-134.
- Michard G., Fouillac C., Vuataz F.D., Criaud A. (1987) - Etude chimique et modèle d'évolution des eaux minérales du Cézallier. *Géologie de la France*, n° 4, p. 133-144.
- Mizutani Y. and Rafter T.A. (1969) - Oxygen isotopic composition of sulphates, 3. Oxygen isotopic fractionation in the bisulphate ion-water system. *N. Zealand J. Sci.*, 12, p. 54-59.
- Nicolini E., Olive P., Coudray J. et Jusserand C. (1991) - Circulation des eaux dans le massif du piton de la Fournaise (île de la Réunion) et leur contamination par les fluides d'origine magmatique. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 312, série II, p. 535-542.
- Pedroletti V. (2001) - Identification minéralogique de 8 échantillons en provenance de l'île de la Réunion (Salazie-Cilaos). Note technique ANA/CMI/NT/01/127, 55 p.
- Rançon J.Ph., Rocher Ph. (1985) - Découverte de zones fumerolliennes récentes dans le cirque de Salazie (île de La Réunion, Océan Indien). *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 300, série II, n° 16, p. 821-826
- Robert D. (1980) - Inventaire et analyse systématiques des différents ensembles d'intrusions volcaniques (dykes et sills) de l'île de la Réunion. Rapport BRGM n° 80 SGN 532 GTH/80 REU 17, 71 p.
- Rocher P. (1988) - Contexte volcanique et structural de l'hydrothermalisme récent dans le massif du piton des Neiges. Iles de LA réunion. Etude détaillée du cirque de Salazie. Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, Centre d'Orsay, 443 p.
- Sakai H., Casadevall T. J. and Moore J.G. (1982) - Chemistry and isotope ratios of sulfur in basalts and volcanic gases at Kilauea volcano, Hawaiï. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, p. 729-738.
- Sanjuan B., Traineau H., Rançon J.Ph., Rocher Ph., Demange J. (2000) - Le potentiel géothermique de La Réunion. Bilan des connaissances et perspectives. Rapport BRGM RP-50388, 89 p.
- Schoeller H. (1962) - Les eaux souterraines, hydrologie, dynamique et chimie ; Recherche, exploitation et évaluation des ressources. Ed. masson et Cie, Paris, 642 p.
- Stieltjes L. (1986). Coulées historiques du piton de la Fournaise. Carte 1/25 000 et notice BRGM, 43 p.

- Stieltjes L. (1995). Texte explicatif préliminaire de la carte géologique du volcan de la Fournaise à 1/25 000. Rapport BRGM R38588, 39 p.
- Truesdell A.H., Mazor E., Nehring N.L. (1983) - The origin of thermal fluids at Lassen volcanic national park : evidence from noble and reactive gas abundances. Geothermal Resources Council, Transactions vol. 7, October 1983.
- Violette S., Ledoux E., Goblet P. and Carbonnel J.P. (1997) - Hydrologic and thermal modeling of an active volcano : the piton de la Fournaise, Réunion. *J. Hydrol.*, 191, p. 37-63.
- Wolery T.J. (1995) - EQ3NR. A computer program for geochemical aqueous speciation-solubility calculations: Theoretical manual, user's guide, and related documentation (version 7.0), 246 p.
- Zlotnicki J., Michel S., Annen C., (1994). Anomalies de polarisation spontanée et systèmes convectifs sur le volcan du piton de la Fournaise (île de La Réunion, France). *CRAS, Série II*, vol. 318, n° 10, p. 1325-1331.

ANNEXE 1

Mesures structurales relevées dans le cirque de Salazie

Site	Station	Dip Dir NG	Type	Pendage	Commentaires
1	2	330	dyke	45	10 cm, extension verticale 10 m
1	2	37	dyke	82	1 m, extension verticale 10 m
1	2	29	dyke	87	0,5 m, extension verticale 10 m
1	2	20	dyke	74	0,5 m, extension verticale 10 m
1	2	1	dyke	70	1 m, extension verticale 10 m
1	2	115	dyke	80	20 cm
1	2	105	joint	80	remplissage blanchâtre
1	2	123	joint	85	remplissage blanchâtre
1	2	75	joint	89	remplissage blanchâtre
1	2	260	joint	57	remplissage blanchâtre, longueur 20 m
1	2	235	litage	15	litage magmatique roche grenue
1	2	60	sill	25	1 m
1	2	301	faille	59	faille normale supposée, pitch 85°N
1	2	15	coulée	10	coulées massives situées au-dessus du complexe intrusif
1	2	45	coulée	10	coulées massives situées au-dessus du complexe intrusif
1	2	297	faille	18	faille normale, Rejet 1,5 m, strie 88° vers le N
1	2	31	joint	64	dépôt ferrugineux, source
1	2	31	joint	64	dépôt ferrugineux, source

Tabl. 1 - SALAZIE 1, ravine Olivette - rivière du Mât (Dip Dir NG représente la direction de plongement de la structure entre 0 et 360° par rapport au nord géographique).

Site	Station	Type	Dip Dir NG	Pendage	Commentaires
2	1	joint	297	85	trace d'oxydation
2	2	joint	85	85	en réseau
2	3	joint	245	86	plan associé à des paléo-fumeroles
2	3	joint	65	38	plan associé à des paléo-fumeroles
2	3	coulée	117	68	interface entre des 2 niveaux d'écoulements
2	3	coulée	107	56	interface entre des 2 niveaux d'écoulements
2	4	faille	65	85	trace verticale 10 m, épaisseur 5-20 cm

Tabl. 2 - SALAZIE 2, rivière du Mât.

Site	Station	profil	Type	Distance	Dip Dir NG	Pendage	Commentaires
4	1		coli		73	25	contact lave récente-lave ancienne
4	1		dyke		51	51	lave aphyrique sombre, 10 cm
4	1		joint		85	90	zéolites en remplissage, décamétrique
4	1		joint		90	90	zéolites en remplissage, décamétrique
4	1		sill		80	30	10 cm
4	1		joint		95	90	zéolites en remplissage, décamétrique
4	1		faille		142	72	faille supposée, rejet cm, pas de strie
4	1		joint		75	90	réseau secondaire
4	1		coli		77	11	contact lave récente-lave ancienne
4	1		joint		75	90	joint sec
4	1		joint		105	90	joint sec
4	1	1-N070	joint	0	217	90	irrégulier, joints non-minéralisés
4	1	1-N070	joint	0,12	240	90	irrégulier
4	1	1-N070	joint	0,47	70	90	très irrégulier
4	1	1-N070	joint	1,52	230	90	assez rectiligne
4	1	1-N070	joint	2,95	230	90	assez rectiligne
4	1	1-N070	joint	3,9	230	90	irrégulier
4	1	1-N070	joint	5,2	225	90	joint maître rectiligne
4	1	1-N070	joint	7,5	230	90	joint maître rectiligne
4	1	1-N070	joint	9,2	215	90	joint maître rectiligne
4	1	1-N070	joint	10	225	90	assez rectiligne
4	1	1-N070	joint	11,3	223	90	joint maître
4	1	1-N070	joint	13,8	205	90	joint maître
4	1		dyke		73	72	débit en prisme, 50 cm
4	1		coli		105	18	surface structurale de la dalle de lave récente
4	1		joint		255	42	zéolites en remplissage
4	1		joint		75	90	réseau secondaire
4	2		coli		65	17	lave récente
4	3		joint		75	90	dans lave massive
4	3		joint		80	75	extension pluri-décamétrique
4	3		joint		210	90	zéolites, extension métrique
4	3		joint		215	90	dans lave massive
4	3		joint		200	90	extension pluri-décamétrique
4	4		dyke		255	85	traverse toute la falaise
4	4		joint		115	90	dans zone fumerollisée
4	4		joint		185	90	dans zone fumerollisée
4	4		joint		225	70	dans zone fumerollisée
4	4		dyke		90	40	proximité zone fumerollisée
4	4		coli		105	90	orientation moyenne de la zone fumerollisée
4	4		dyke		330	70	50 cm

Tabl. 3 - SALAZIE 4, rivière des Fleurs Jaunes.

Site	Station	Type	Dip Dir NG	Pendage	Commentaires
5	1	dyke	40	85	50 cm
5	1	dyke	75	80	30 cm
5	1	joint	50	60	plan intradyke
5	1	joint	285	55	plan courbe dans brèche altérée
5	1	joint	200	40	proximité émergence
5	1	joint	230	86	proximité émergence
5	1	joint	135	60	proximité émergence
5	1	dyke	315	45	45 cm
5	1	dyke	140	87	50 cm
5	1	joint	10	85	remplissage de zéolite, e=2 mm, métrique
5	1	joint	35	86	remplissage de zéolite, e=2 mm, métrique
5	1	sill	40	10	lave
5	1	dyke	21	62	1 m
5	1	dyke	40	55	40 cm
5	1	joint	5	65	remplissage de zéolite, e=2 mm, métrique
6	2	dyke	280	77	55 cm
6	2	dyke	25	82	20 cm
6	2	sill	13	68	80 cm
6	2	joint	10	82	plurimétrique sans remplissage, cataclase
6	2	joint	315	34	plurimétrique sans remplissage, cataclase
6	2	joint	353	39	plurimétrique sans remplissage, cataclase
6	2	faille	10	82	faille supposée
6	2	joint	90	41	pluri-métrique
6	3	joint	178	71	pluri-métrique
6	3	joint	103	80	pluri-métrique
6	3	dyke	13	69	60 cm, lave aphyrique
6	3	dyke	278	65	1m, dyke évoluant en sill
6	3	dyke	72	70	30 cm
6	3	dyke	23	80	60 cm, lave grise aphyrique
6	3	dyke	77	78	40 cm, lave grise aphyrique
6	3	joint	331	57	pluri-métrique affectant une brèche ancienne
6	3	sill	47	32	lave aphyrique

Tabl. 4 - SALAZIE 5, source Manouilh et SALAZIE 6, rivière du Mât - Trou Blanc.

Site	Station	Type	Dip Dir NG	Pendage	Commentaires
7	1	sill	179	28	1 m
7	1	dyke	284	85	30 cm, lave grise

Tabl. 5 - SALAZIE 7, camp Pierrot - Grand Sable.

ANNEXE 2

Mesures structurales relevées dans le cirque de Cilaos

Station	Profil	Type	Distance	Dip Dir NG	Pendage	Commentaires
1	1-N305	sill	0	9	31	plan intradyke
1	1-N305	sill	4	351	28	contact lithologique microsyénite/encaissant
1	1-N305	dyke	9,2	299	74	40 cm
1	1-N305	dyke	18	63	64	joint dans l'encaissant
1	1-N305	dyke	22	83	48	réseau de dykes de 0,2 à 1 m
1	1-N305	dyke	25	301	48	dyke sombre tardif recoupant tout
1	1-N305	joint	25	325	55	réseau de joints dans l'encaissant
1	1-N305	joint	27	327	52	espacement moyen de 25 cm
1	1-N305	joint	28	331	51	réseau de joints secs ou minéralisés
1	1-N305	dyke	29	121	51	dyke épaisseur variable, hydrothermalisé
1	1-N305	joint	36	21	67	60 cm
1	1-N305	joint	36,2	27	64	plan de fracturation intradyke
1	1-N305	joint	40	359	56	joint hydrothermalisé
1	1-N305	joint	41,5	330	50	joint hydrothermalisé
1	1-N305	dyke	43	157	86	contact lithologique microsyénite/encaissant
1	1-N305	joint	45	101	44	50 cm
1	1-N305	joint	50	11	67	joint hydrothermalisé
1	1-N305	joint	50,5	281	88	25 cm
1	1-N305	dyke	63	266	67	Trachyte 80 cm

Tabl. 6 - CILAOS 1, route d'Ilet à Cordes, station 1.

Station	Profil	Type	Distance	Dip Dir NG	Pendage	Commentaires
2		dyke		243	48	plan moyen
2		sill		297	34	
3		sill		255	34	50 cm dyke hydrothermalisé
3		dyke		286	56	dyke prismé 1 m
4	1-N265	dyke	0	286	65	plan de fracturation intradyke
4	1-N265	dyke	5	267	46	zone injectée de dykes/sills métriques
4	1-N265	dyke	31	313	74	trachyte 1 m
4	1-N265	dyke	33	303	85	30 cm
4	1-N265	dyke	34	109	77	de 0-4 m, zone injectée de dykes de 0,1 à 1 m
4	1-N265	joint	34,1	19	61	joint intrasill
4	1-N265	joint	34,2	109	69	
4	1-N265	joint	34,2	172	58	irrégulier, 5 à 20 cm
4	1-N245	sill	38	9	16	joint dans intrusion de microsyénite
4	1-N245	joint	38,1	294	75	fracturation intrasill, plan moyen
4	1-N245	sill	56	223	36	125 cm
4	1-N245	sill	65	250	34	de 33,5-46 m, zone injectée de sills de 1 à 2 m
4	1-N245	dyke	70.5	270	50	15 cm
4	1-N245	dyke	77	293	61	50 cm
4	1-N245	dyke	80	309	48	10 cm
4	1-N245	dyke	86	266	50	120 cm
4	1-N245	dyke	88	283	69	de 11-15 m, zone injectée de dykes de 0,1 à 1 m
4	1-N245	dyke	90	273	56	de 66-75 m, zone injectée de dykes de 0,1 à 1 m
4	1-N245	dyke	95	57	49	40 cm
4	1-N245	dyke	105	293	54	45 cm
5	1-N245	dyke	1	285	66	trachyte 60 cm
5	1-N245	dyke	2	273	71	20 cm irrégulier
5	1-N245	dyke	11	302	63	de 0-11 m, zone injectée de dykes de 0,1 à 1 m
5	1-N245	dyke	17	213	41	25 cm
5	1-N245	dyke	24	293	59	20 cm
5	1-N245	sill	31	283	38	trachyte 50 cm
5	1-N245	sill	43	275	39	réseau de dyke chronologie 2
5	1-N245	dyke	43,5	303	87	10 cm
5	1-N245	dyke	48	147	86	40 cm
5	1-N245	dyke	53	238	54	60 cm dyke hydrothermalisé
5	1-N245	dyke	63	273	64	1 m
5	1-N245	dyke	70	274	47	60 cm
5	1-N245	dyke	91	270	48	80 cm
5	1-N245	dyke	97	307	84	irrégulier, 35 cm

Tabl. 7 - CILAOS 1, route d'Ilet à Cordes, stations 2 à 5.

Station	Profil	Type	Distance	Dip Dir NG	Pendage	Commentaires
6		dyke		255	83	dyke 1 m
6		sill		266	38	1 m
6		sill		271	44	60 cm
7	1-N255	dyke	0	253	74	réseau de sill chronologie 1
7	1-N255	dyke	9	280	68	plan mal défini
7	1-N255	dyke	11	283	49	dans la roche massive
7	1-N255	dyke	17,5	280	81	joint dans l'encaissant
7	1-N255	dyke	23	289	52	zone injectée de dykes
7	1-N290	sill	33,5	259	36	40 cm
7	1-N290	joint	35	137	65	plan intradyke
7	1-N290	joint	36	23	58	80 cm non altéré
7	1-N290	dyke	51	317	56	réseau de dykes de 0,4 à 0,20 m
7	1-N290	dyke	58	337	49	plan de fracturation intradyke
7	1-N290	dyke	64,5	293	85	réseau de dykes de 0,1 à 0,5 m
7	1-N290	dyke	67	308	51	1 m
7	1-N290	dyke	76	298	51	dykes en réseau
7	1-N290	dyke	79	329	66	réseau de dykes de 0,1 à 0,3 m
7	1-N290	dyke	86,5	311	68	50 cm
7	1-N290	sill	98	323	39	1 m
7	1-N290	joint	98,1	27	62	joint hydrothermalisé
7	1-N290	joint	98,2	153	83	joint intrasill

Tabl. 8 - CILAOS 1, route d'Ilet à Cordes, stations 6 à 7.

Station	Profil	Type	Distance	Dip Dir NG	Pendage	Commentaires
11	1-N130	joint	0	135	63	joint isolé
11	1-N130	joint	0,7	137	73	joint isolé
11	1-N130	joint	0,72	144	79	joint isolé
11	1-N130	joint	0,8	137	86	joint maître, bord de couloir
11	1-N130	joint	1,2	146	85	joint interne au couloir
11	1-N130	joint	1,28	146	80	joint interne au couloir
11	1-N130	joint	1,64	148	70	joint interne au couloir
11	1-N130	joint	2,05	151	75	joint maître, bord de couloir
11	1-N130	joint	2,4	152	78	joint isolé
11	1-N130	joint	3,5	145	66	joint isolé
11	1-N130	joint	4,6	145	75	couloir de joint, plan moyen de la famille de joint
11	1-N130	joint	5,65	145	75	couloir de joint
11	1-N130	joint	5,7	145	75	couloir de joint
11	1-N130	joint	6,5	145	75	couloir de joint
11	1-N130	joint	6,85	145	75	couloir de joint
11	1-N130	joint	8,2	145	75	joint isolé
11	1-N130	joint	8,3	145	75	joint isolé
11	1-N130	joint	8,5	145	75	couloir de joint
11	1-N130	joint	8,52	145	75	couloir de joint
11	1-N130	joint	9,2	145	75	joint isolé
11	1-N130	joint	9,35	145	75	joint isolé
11	1-N130	joint	9,55	145	75	couloir de joint
11	1-N130	joint	9,7	145	75	couloir de joint
11	1-N130	joint	11,3	145	75	couloir de joint
11	1-N130	joint	11,6	145	75	couloir de joint
11	1-N130	joint	12,1	145	75	joint isolé
11	1-N130	joint	12,75	145	75	couloir de joint
11	1-N130	joint	13,7	145	75	couloir de joint
11	1-N130	joint	13,8	145	75	couloir de joint
11	1-N130	joint	14,8	145	75	couloir de joint
11	2-N110	joint	0	130	78	plan moyen de la famille de joint
11	2-N110	joint	0,21	130	78	plan moyen de la famille de joint
11	2-N110	joint	0,4	130	78	plan moyen de la famille de joint
11	2-N110	joint	0,55	130	78	plan moyen de la famille de joint
11	2-N110	joint	0,6	130	78	plan moyen de la famille de joint
11	2-N110	joint	0,72	130	78	plan moyen de la famille de joint
11	2-N110	joint	0,78	130	78	plan moyen de la famille de joint
11	2-N110	joint	0,95	130	78	plan moyen de la famille de joint
11	2-N110	joint	1,2	130	78	plan moyen de la famille de joint

11	2-N110	joint	1,44	130	78	plan moyen de la famille de joint
11	2-N110	joint	1,65	130	78	plan moyen de la famille de joint
11	2-N110	joint	1,81	130	78	plan moyen de la famille de joint
11	2-N110	joint	2,4	130	78	plan moyen de la famille de joint
11	2-N110	joint	2,6	130	78	plan moyen de la famille de joint
11	2-N110	joint	4,1	130	78	plan moyen de la famille de joint
11	3-N075	joint	0	129	88	joint dans intrusion de microsyénite
11	3-N075	joint	0,3	129	88	joint dans intrusion de microsyénite
11	3-N075	joint	1,2	293	84	joint dans intrusion de microsyénite
11	3-N075	joint	2,2	126	84	joint dans intrusion de microsyénite
11	3-N075	joint	4,1	123	86	joint dans intrusion de microsyénite
11	3-N075	joint	7,4	121	84	joint dans intrusion de microsyénite
11	3-N075	joint	7,8	281	38	zone injectée de dykes/sills de 0,1 à 0,5 m
11	3-N075	joint	8,6	118	84	joint dans intrusion de microsyénite
11	3-N075	joint	11,4	121	86	joint dans intrusion de microsyénite
11	3-N075	joint	11,5	119	86	joint dans intrusion de microsyénite
11	3-N075	joint	11,8	117	89	joint dans intrusion de microsyénite
11	3-N075	joint	15,5	205	28	1 m

Tabl. 9 - CILAOS 1, route d'Ilet à Cordes, station 11.

Station	Profil	Type	Distance	Dip Dir NG	Pendage	Commentaires
1		dyke		259	84	1 m de dyke de trachyte intrudant des dykes plus anciens
2		coli		30	75	lame de syénite
2		coli		35	70	lame de syénite
3		joint		73	71	joint bien marqué dans l'encaissant
3		joint		86	52	plan pluri-métrique dans l'encaissant
3		joint		95	80	réseau de joints secondaires à 110 m aval source
3		joint		96	72	joint dans l'encaissant avec 2 à 10 cm de dépôts d'hydroxydes de fer
3		dyke		270	62	dyke dans encaissant zéolitisé
3		dyke		272	58	dyke dans encaissant zéolitisé
3		dyke		291	71	dyke de 20 cm dans l'encaissant, 50 m aval source
3		joint		291	50	joints à Qtz-carbonates-phyllites dans ce corps
3		joint		130	83	réseau de joints dominant à 110 m aval source
3		dyke		137	66	dyke dans encaissant zéolitisé
3		joint		145	86	joint en réseau dans encaissant
3		coli		115	90	corps de roche μ grenue verdâtre, 100 m aval source
3		joint		55	46	joint dans l'encaissant avec 2 à 10 cm de dépôts d'hydroxydes de fer
3		joint		225	46	joint tardif à proximité source Jacqueline
3		sill		235	39	sill dans encaissant zéolitisé
3		joint		220	90	réseau de joints secondaires à 110 m aval source

Tabl. 10 - CILAOS 2, GR2 : Cilaos - rivière du Bras Rouge, stations 1 à 3.

Station	Profil	Type	Dist.	Dip Dir NG	Pendage	Commentaires
4		joint		135	80	plan formant la bordure sud de la microsénénite
4		joint		150	78	joints secs pluri-métriques, espacement moyen 20 cm
5	P1-N165	joint	0	170	90	pendage supposé vertical, 10 m de long
5	P1-N165	joint	1,4	150	90	pendage supposé vertical, 8 m de long
5	P1-N165	joint	2,05	150	90	pendage supposé vertical, 6 m de long
5	P1-N165	joint	2,7	147	90	pendage supposé vertical, 12 m de long
5	P1-N165	joint	3,75	147	90	pendage supposé vertical, 12 m de long
5	P1-N165	joint	4,8	149	90	pendage supposé vertical, 7 m de long
5	P1-N165	joint	5,95	158	90	pendage supposé vertical, 6 m de long
5	P1-N165	joint	6,52	162	90	pendage supposé vertical, 10 m de long
5	P1-N165	joint	6,65	165	90	pendage supposé vertical, 10 m de long
5	P1-N165	joint	6,7	113	90	pendage supposé vertical, 15 m de long, rectiligne
5	P1-N165	joint	7,1	162	90	pendage supposé vertical, 10 m de long
5	P1-N165	joint	7,67	161	90	pendage supposé vertical, 5 m de long
5	P1-N165	joint	8,45	162	90	pendage supposé vertical, 3 m de long
5	P1-N165	joint	9,14	163	90	pendage supposé vertical, 8 m de long
5	P1-N165	joint	9,5	152	90	pendage supposé vertical, 3 m de long
5	P1-N165	joint	10,42	169	90	pendage supposé vertical, 6 m de long
5	P1-N165	joint	10,7	117	90	pendage supposé vertical, 15 m de long, rectiligne
5	P1-N165	joint	11,5	167	90	pendage supposé vertical, 5 m de long
5	P1-N165	joint	13,7	113	90	pendage supposé vertical, 15 m de long, rectiligne
5	P1-N165	joint	15,52	163	90	pendage supposé vertical, 10 m de long

Tabl. 11 - CILAOS 2, GR2 : Cilaos - rivière du Bras Rouge, stations 4 à 5.

Station	Profil	Type	Distance	Dip Dir NG	Pendage	Commentaires
2		dyke		21	46	30 cm, dans la Chapelle
2		dyke		21	52	15 cm, dans la Chapelle
2		joint		303	80	réseau de joints rectilignes dans microsyénite
2		dyke		330	71	dyke dans océanites, 50 cm
2		joint		151	51	joint dans microsyénite au niveau d'une émergence fossile
2		joint		144	69	joint dans microsyénite au niveau d'une émergence fossile
3	P1-N315	joint	0	267	90	fissure ouverte 2 mm sans dépôt
3	P1-N315	joint	4,5	99	70	fissure ouverte avec dépôt blanchâtre
3	P1-N315	joint	8	92	78	fissure fermée sans dépôt
3	P1-N315	dyke	9,6	276	88	10 cm, lave sombre
3	P1-N315	faille	13,56	263	76	dépôt blanchâtre, mouvement dextre, rejet 30 cm sur galets, pitch 37° sud
3	P1-N315	faille	16,05	102	68	faille avec miroir, pitch 48° sud
3	P1-N315	faille	16,3	305	83	faille avec faible rejet senestre apparent
3	P1-N315	faille	17	87	87	faille avec décalage apparent
3	P1-N315	faille	17,4	267	86	faille dextre, pitch 22° sud, 2 mm de dépôt
3	P1-N315	dyke	18,45	157	80	10 cm lave
3	P1-N315	faille	19,3	268	79	faille dextre apparent, 2 mm de dépôt
3	P1-N315	joint	19,7	117	82	joint dans microsyénite au niveau d'une émergence fossile
3	P1-N315	joint	19,95	296	72	joints en réseau mal exprimés
3	P1-N315	joint	20,65	118	62	joint sans dépôt
3	P1-N315	faille	21,65	197	55	faille dextre apparent sur un dyke
3	P1-N315	dyke	23,1	305	70	25 cm lave sombre
3	P1-N315	joint	23,95	137	62	joint avec dépôt blanc 2 mm
3	P1-N315	faille	28	87	85	faille, pitch 22° sud, dextre ?
3	P1-N315	joint	29,2	267	72	joint avec dépôt blanc 1 mm
3	P1-N315	joint	29,5	347	66	joint avec dépôt blanc 1 mm
3	P1-N315	faille	31	140	78	faille avec dépôt blanc 1 mm
4		faille		284	86	faille avec dépôt blanc 1 mm, pitch 14° sud, dextre apparent, rejet 30 cm
4		dyke		277	47	40 cm lave sombre
6		joint		297	72	joint irrégulier 15 m de long avec dépôt

Tabl. 12 - CILAOS 3 : Bras Rouge - La Chapelle, stations 1 à 6.

Station	Profil	Type	Distance	Dip Dir NG	Pendage	Commentaires
7		coli		280	50	Contact lithologique
7		joint		65	48	filonnet à silice parallèle au contact roche sombre
7		joint		140	65	filonnet à silice parallèle au contact roche sombre
7	P1-N095	joint	0	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	0,19	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	0,51	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	0,96	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	1,26	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	1,39	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	2,1	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	2,4	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	2,95	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	3,25	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	3,48	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	3,7	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	3,86	140	66	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	4,04	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	4,45	133	68	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	4,82	135	71	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	5,15	123	66	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	5,23	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	5,35	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	5,6	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	6	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	6,15	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	6,38	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	6,92	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	7,6	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7	P1-N095	joint	7,7	135	70	joint systématique rectiligne, roche grenue sombre
7		dyke		261	48	lave sombre, 10 cm
7		dyke		85	45	roche microgrenue claire, 8 cm
7		joint		220	75	

Tabl. 13 - CILAOS 3 : Bras Rouge - la Chapelle, station 7.

Station	Profil	Type	Distance	Dip Dir NG	Pendage	Commentaires
1		faille		67	64	mouvement indéterminé, apparent normal
1		faille		80	62	extension pluri-métrique, pitch 22° sud, mouvement apparent senestre
1		dyke		81	62	60 cm
1		dyke		82	62	80 cm
1		faille		86	74	dépôt blanchâtre, cinématique indéterminée
1		dyke		97	75	zone injectée de dykes
1		faille		253	70	dépôt blanchâtre, cinématique indéterminée
1		faille		262	82	dépôt blanchâtre, extension pluri-métrique, cinématique indéterminée
1		joint		268	83	plan métrique, dépôt blanchâtre
1		faille		55	82	dyke recoupé par une faille ayant un pitch de 15° N
1		faille		55	67	plan métrique, dépôt blanchâtre, pitch 45° sud, mouvement apparent dextre
1		faille		63	78	dépôt blanchâtre, pitch 28° sud, mouvement apparent dextre
1		dyke		63	83	15 cm

Tabl. 14 - CILAOS 4, Cilaos - Saint-Louis, route N5.

ANNEXE 3

Position des sites d'observations et de mesures dans les cirques de Salazie et Cilaos, piton des Neiges

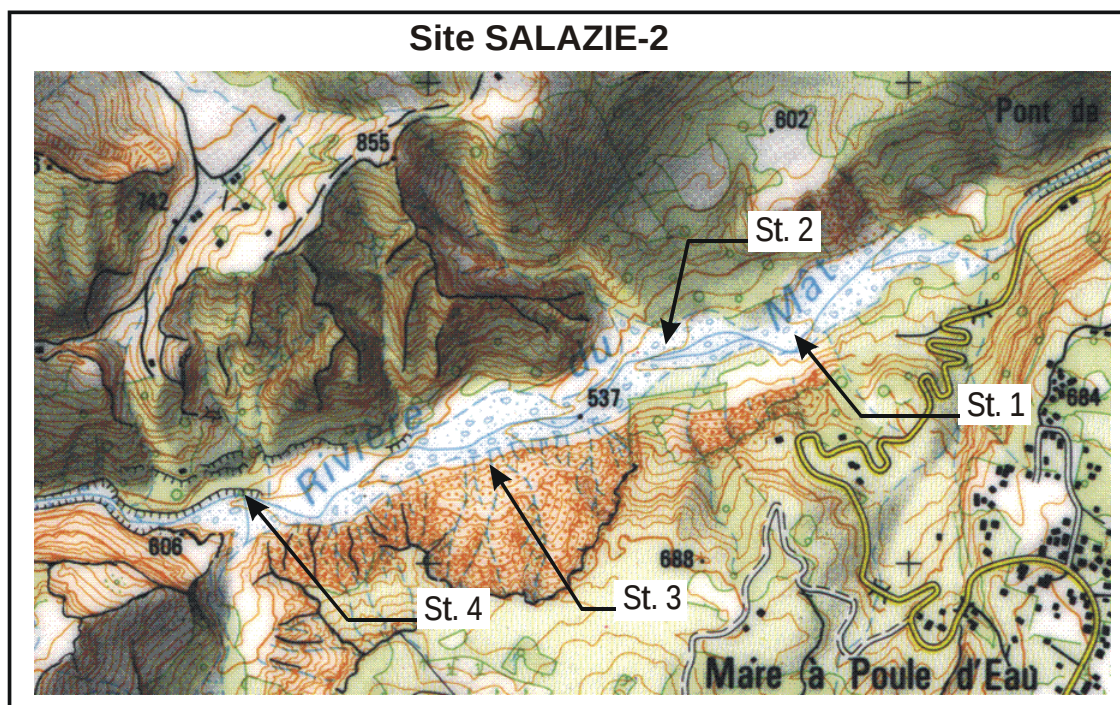
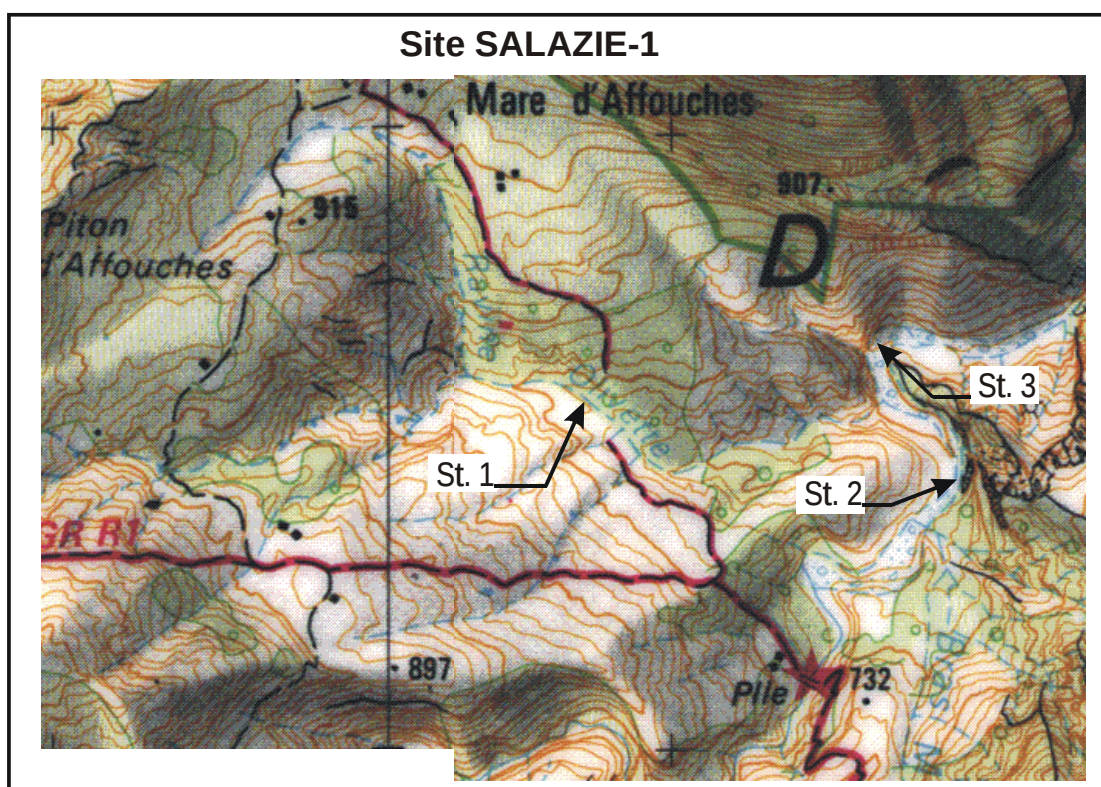


Planche 1 - Localisation des stations d'observations et de mesures des sites de SALAZIE-1 et SALAZIE-2 reportée sur le fond topographique au 1/25 000 de l'IGN.

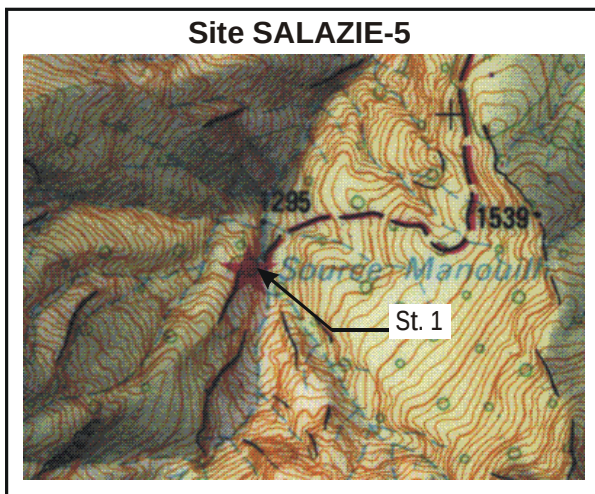
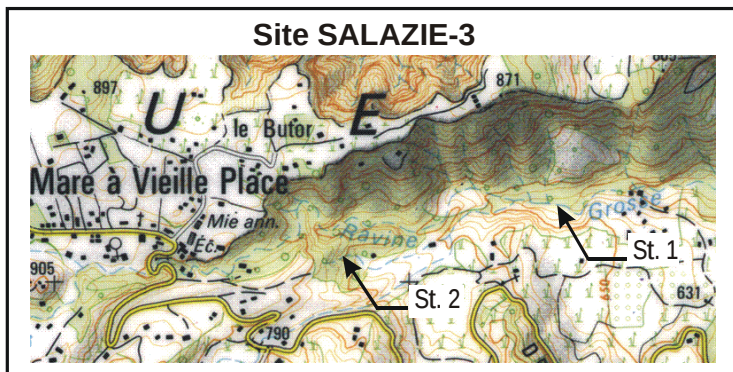


Planche 2 -Localisation des stations d'observations et de mesures des sites de SALAZIE-3, SALAZIE-4 et SALAZIE-5 reportée sur le fond topographique au 1/25 000 de l'IGN.

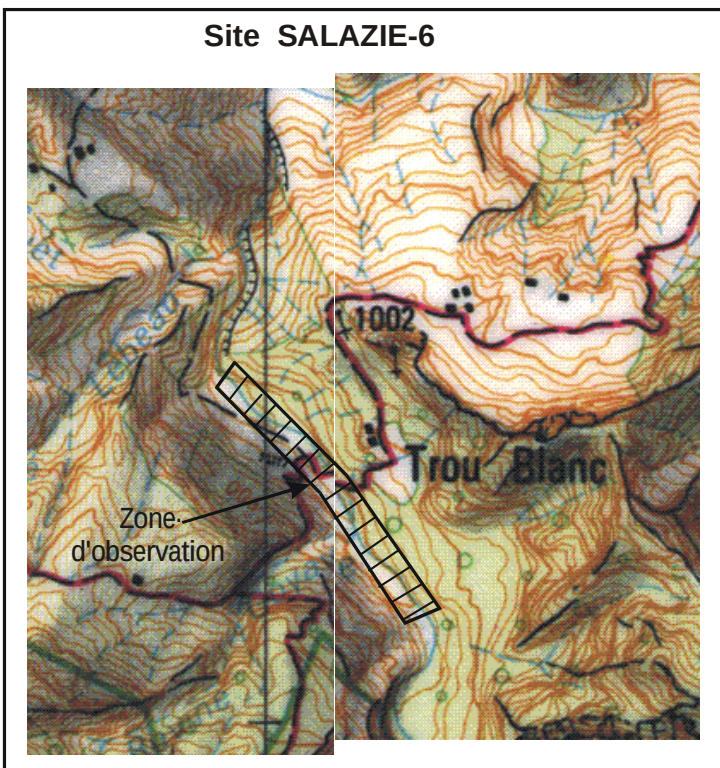
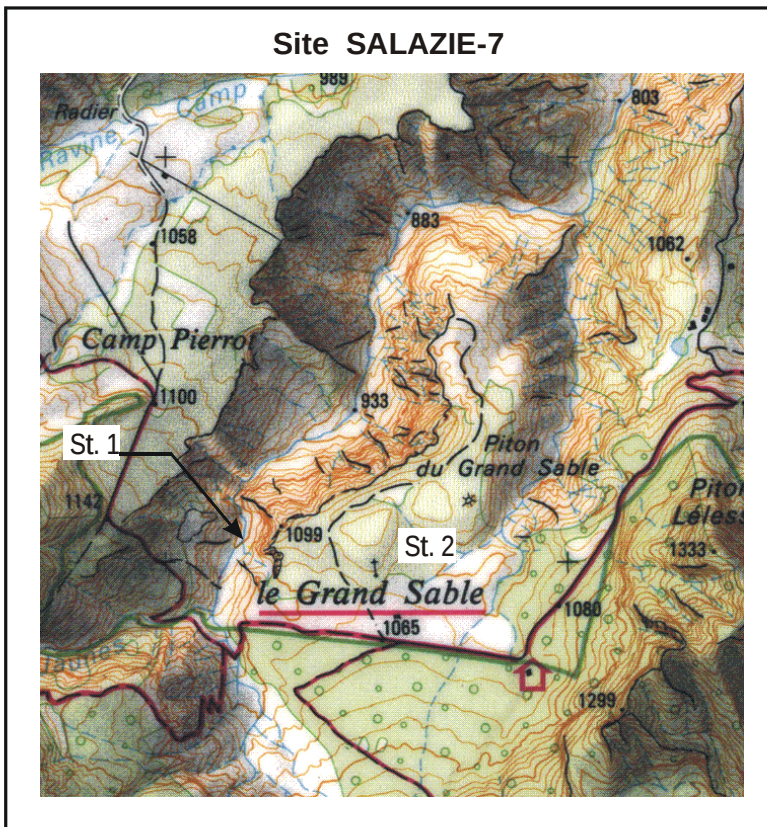


Planche 3 - Localisation des stations d'observations et de mesures des sites SALAZIE-6 et SALAZIE-7.

Site CILAOS-1

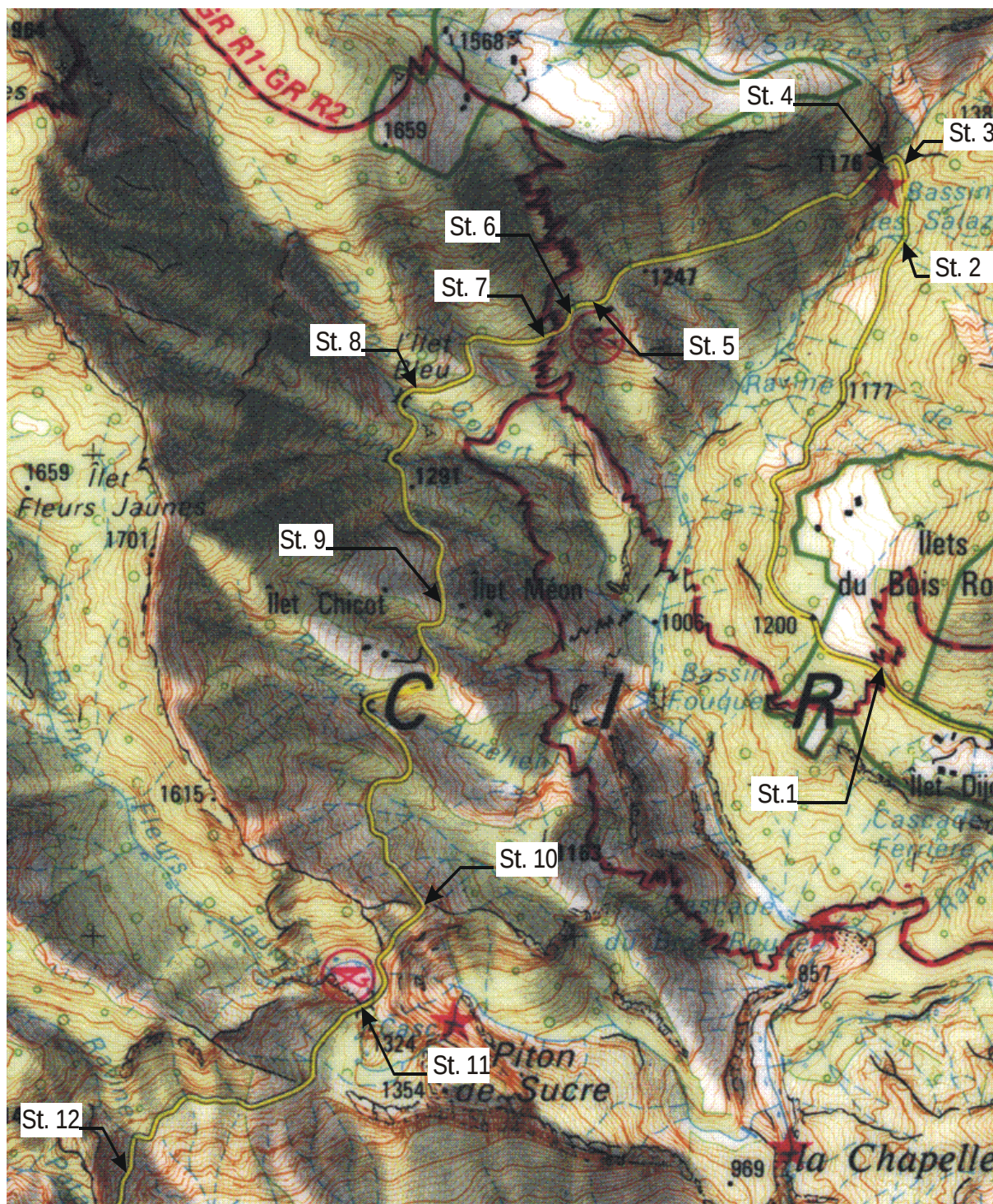


Planche 4 - Localisation des stations d'observations et de mesures du site CILAOS-1 reportée sur le fond topographique au 1/25 000 de l'IGN.

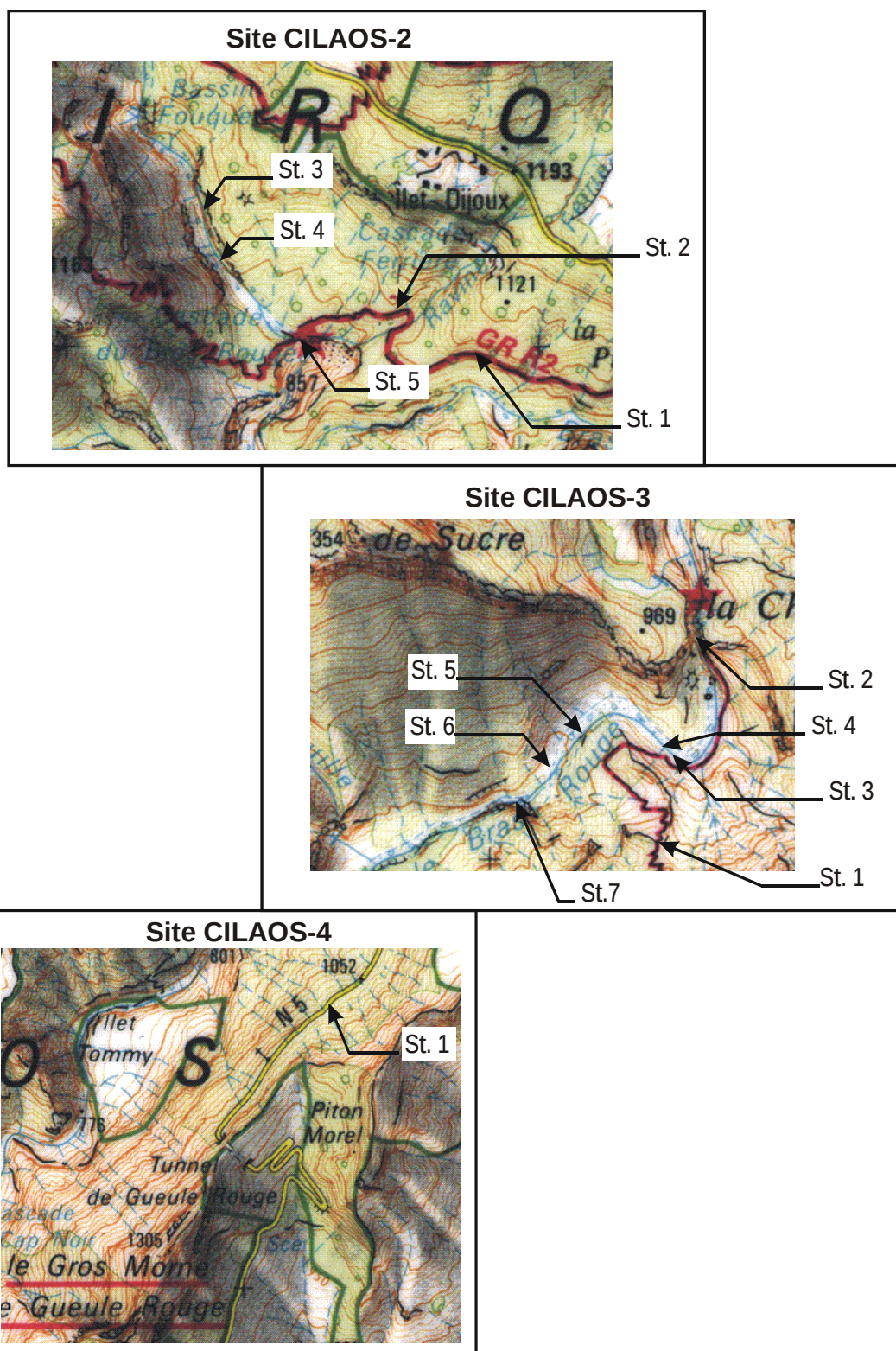


Planche 5 - Localisation des stations d'observations et de mesures des sites CILAOS-2, CILAOS-3, et CILAOS-4 reportée sur le fond topographique au 1/25 000 de l'IGN.

ANNEXE 4

**Conditionnement des échantillons d'eau prélevés
au cours de la campagne d'échantillonnage des
eaux thermales des cirques de Salazie et de
Cilaos, réalisée en octobre 2000.**

Echantillon	Analyse anions	Analyse cations	Analyse traces	Analyse D, ¹⁸ O	Analyse D, ¹⁸ O, ³ H	Analyse ³⁴ S, ¹⁸ O (SO ₄)	Analyse ¹⁴ C, ¹³ C	Analyse ^{87/86} Sr
Traitement	filtration 0,45 µm	filtration 0,45 µm + HNO ₃	filtration 0,1 µm + HNO ₃	brut	brut	brut + acetate Cd	brut	filtration 0,1 µm + HNO ₃
Récipient	PE 250 ml	PE 100 ml	PE 100 ml	PE 100 ml	PE 1l	PE 2l	PE 1l	PE 100 ml
Salazie								
SLZ1	X	X		X		X	X	
SLZ2	X	X		X				
SLZ3	X	X	X		X			
SLZ4	X	X			X	X	X	X
SLZ5	X	X		X				
SLZ6				X				
SLZ7	X	X	X		X	X	X	X
SLZ8	X	X	X		X	X	X	X
SLZ9	X	X						
SLZ10	X	X		X				
SLZ11	X	X	X	X				X
SLZ12	X	X	X		X	X	X	X
SLZ13	X	X	X		X	X	X	X
Cilaos								
CILA1	X	X	X		X	X	X	X
CILA2	X	X	X		X	X	X	X
CILA3	X	X	X		X	X	X	X
CILA4	X	X	X		X	X	X	X
CILA5				X				
CILA6	X	X	X		X	X	X	X
CILA7	X	X	X		X	X	X	X
CILA8	X	X	X		X		X	X

ANNEXE 5

Évolution de la composition chimique, en fonction du temps, des eaux des sources thermales des cirques de Salazie et de Cilaos

Source	n°	indice BSS	date prélev.	T °C	Debit l/s	pH	TDS mg/l	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Cl mg/l	Alc. mg/l HCO ₃	SO ₄ mg/l	SiO ₂ mg/l	Fe mg/l	B mg/l	F mg/l	NH ₄ mg/l	Sr mg/l	Ba µg/l	Li µg/l	Rb µg/l	P _{CO2} atm	Cl/B	Na/Cl	Na/K	Na/Li			
Manhouil (BRGM)	LS7 (grifon 2)	1227-5X-0014	1957	30,0		6,80		115	9,0	100	75	1,4	1589	23																	
	LS7 (grifon 3)	1227-5X-0014	1957	30,0		7,05		100	11	144	69	1,3	1388	26																	
	LS7 (grifon 5)	1227-5X-0014	1957	nd		7,20		71	11	146	75	1,2	1111	16																	
	LS7 (grifon a)	1227-5X-0014	11/06/70	27,2	0,55	7,10																									
	LS7 (grifon b)	1227-5X-0014	11/06/70	30,5	0,16	nd		90	9,5	48	113	10	903	1,2																	
	LS7 (grifon c)	1227-5X-0014	11/06/70	24,7	0,40	nd																									
	LS7	1227-5X-0014	24/06/78	30,5	0,20	6,15	2550	122	9,2	41	78	3,1	2172	12	108	3,3	< 0,1	0,20	< 0,02	0,90		30	< 10	1,86		39	13	4,1			
	LS7	1227-5X-0014	13/10/87	31,0				118	9,7	144	68	2,5	1141	13																	
	L7	1227-5X-0014	02-94	30,2		6,60	1357	91	7,7	127	64	3,4	961	3,9	98					0,70	17,3	28	20	0,29		27	12	3,3			
Manouilh (Louvât et al., 1997)	SLZ3	1227-5X-0014	19/10/00	19,0	0,0053	7,90	1395	62	4,3	160	74	1,6	964	10	96	0,1	0,050	< 0,1	< 0,1	0,89	8,0	15	0,01	32	39	14	4,1				
Manouilh (cette étude)	SLZ4	1227-5X-0014	19/10/00	30,6	0,14	6,59	1720	115	8,8	165	84	2,8	1172	13	120	3,2	0,085	0,2	< 0,1	0,80	25,0	33	26	0,36	33	41	13	3,5			
Source Ravine Bachelier (BRGM)	LS11	1226-8X-0028	10/06/70	28,2	0,11	6,70																									
Source Ravine Bachelier (BRGM)	LS11	1226-8X-0028	25/06/78	25,6	0,30	7,60	1290	110	5,9	50	83	3,1	944	18	76	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,02	0,50		< 10	< 10	0,029		35	19				
Source Ravine Bachelier (BRGM)	LS11	1226-8X-0028	12/10/87	24,0				110	6,2	85	75	2,4	888	16																	
Source Ravine Bachelier (cette étude)	SLZ7	1226-8X-0028	21/10/00	19,4	0,02	7,42	1645	127	6,1	144	85	3,3	1141	19	92	< 0,02	0,058	< 0,1	< 0,1	0,91	< 5	20	23	0,053	57	38	21	6,4			
Grand Sable (BRGM)	BR1	1226-8X-0027	04/06/70	21,2	0,65	6,80		38	1,2	50	87	7,3		13																	
Grand Sable (BRGM)	BR1	1226-8X-0027	14/10/87	18,0				12	1,9	12	4,3	1,2	88	2,3																	
Grand Sable (BRGM)	BR1	1226-8X-0027	25/01/89	21,0				26	2,2	104	41	1,0	464	106																	
Grand Sable (BRGM)	BR1	1226-8X-0027	22/01/92	19,0		8,00	830	30	1,8	123	50	8,4	464	153				< 0,1						0,006		3,5	17				
Grand Sable (cette étude)	SLZ12	1226-8X-0027	22/10/00	18,6	> 0,1	6,57	1114	30	3,6	185	53	1,8	513	278	43	< 0,02	0,022	0,2	< 0,1	0,98	< 5	4,0	14	0,17	82	17	8	7,5			
Ravine Olivette (Thèse Rocher, 1988)	PR1		1984	35,5			6005	1435	31	110	127	603	3234	349	116												2,4	47	3,6		
Ravine Olivette (cette étude)	SALZ13		26/10/00	26,0		6,05	4849	1080	22	165	111	456,0	2603	303	48	0,42	12,89	0,7	< 0,1	1,74	8	41	70	2,81	35	2	50	26,3			

Evolution de la composition chimique, en fonction du temps, des eaux des sources thermales du cirque de Salazie dans l'île de la Réunion.

Source	n°	Indice BSS	date prélèv.	T °C	Débit l/s	pH	TDS mg/l	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Cl mg/l	Alc. mg/l HCO ₃	SO ₄ mg/l	SiO ₂ mg/l	Fe mg/l	B mg/l	F mg/l	NH ₄ mg/l	Sr mg/l	Ba µg/l	Li µg/l	Rb µg/l	P _{CO2} atm	Cl/B	Na/Cl	Na/K	Na/Li
Bras Benjoin (BRGM)	LS1	1228-4X-0057	04/07/69	23,5	0,01																							
Bras Benjoin (BRGM)	LS1	1228-4X-0057	04/07/69	26,5	0,07																							
Bras Benjoin (BRGM)	LS1	1228-4X-0057	20/06/78	25,5	0,1	6,83	1647	134	3,2	160	82	12,0	944	204	103	4,4	< 0,1	0,11	0,03	0,50		< 10	< 10	0,17		11	42	
Bras Benjoin (BRGM)	LS1	1228-4X-0057	04/11/86	21,8				115	3,0	130	75	8,5	880	175														
Bras Benjoin (cette étude)	CILA1	1228-4X-0057	24/10/00	22,6	0,0032	6,66	1659	127	2,8	170	82	12,2	941	204	113	2,7	0,115	0,10	< 0,1	0,48	< 5	7,0	5,0	0,25	106	10	45	18
Irénée (R. Lautel)		1226-8X-0039	15/03/50	38,0	nd			151	8,6	220	62	3,6	2225	77	140													
Irénée (BRGM)	Puits P4	1226-8X-0039	04-68	39,2	nd	6,40																						
Irénée (BRGM)	Puits P5	1226-8X-0039	11/07/68	38,3	1,4	6,40																						
Irénée (BRGM)	LS2	1226-8X-0039	28/11/68	39,8	6,0	6,40		360	4,0	154	105	12,0	1890	107	132													
Irénée (BRGM)	LS2	1226-8X-0039	28/11/68	39,8	1,4	6,40		380	4,0	152	106	8,8	1880	120	118													
Irénée (établissement thermal, BRGM)	LS2	1226-8X-0039	20/06/78	38,5	1,9	6,10	2774	365	7,8	172	103	3,8	1889	84	140	7,1	0,200	< 0,1	0,04	1,80		< 10	80,0	1,82	19	96	47	
Irénée (établissement thermal, BRGM)	LS2	1226-8X-0039	15/10/80	38,5	nd			364	7,6	168	97	5,2	1934	101														
Irénée (établissement thermal, BRGM)	LS2	1226-8X-0039	10/04/86	38,5	nd			412	10,6	180	93	6,0	2001	120														
Irénée (établissement thermal, BRGM)	LS2	1226-8X-0039	04/11/86	38,5	nd			330	8,2	164	102	3,3	1850	99														
Irénée (établissement thermal, BRGM)	LS2	1226-8X-0039	11/05/87	38,0	nd			370	8,7	225	73	6,0	1818	120														
Irénée (établissement thermal, BRGM)	LS2	1226-8X-0039	01/03/88	34,0	nd			362	8,6	230	68	6,0	1965	116														
Irénée (établissement thermal, BRGM)	LS2	1226-8X-0039	15/11/89	38,0	nd			373	8,0	163	108	5,3	1883	105														
Irénée (établissement thermal, BRGM)	LS2	1226-8X-0039	22/02/90	38,0	nd							10,7	1920															
Irénée (établissement thermal, BRGM)	LS2	1226-8X-0039	22/04/90	38,0	nd			367	7,4	170	105	6,5	1893	98														
Irénée (établissement thermal, BRGM)	LS2	1226-8X-0039	27/12/90	35,0	nd			363	7,7	183	114	3,7	1903	100														
Irénée (établissement thermal, BRGM)	LS2	1226-8X-0039	23/05/91	37,5	nd			117	7,6	240	150	7,1	1775	83														
Irénée (établissement thermal, BRGM)	LS2	1226-8X-0039	29/01/92	38,5	nd			323	7,2	240	131	8,9	2030															
Irénée (établissement thermal, BRGM)	LS2	1226-8X-0039	29/04/92	37,0	nd			328	7,0	176	109	14,2	2806	106														
Irénée (Iundt et al., 1992)	LS2	1226-8X-0039	07/92	36,9	2,1	6,02		332	6,7	130	90	5,5	1525	101	153	6,9	0,153	< 0,1	< 0,1	0,57	< 5	< 100		1,76	36	60	50	
Irénée (Louvât et al., 1997)	L1	1226-8X-0039	08-93	37,5	nd	6,30	2748	390	8,4	120	100	3,4	1940	56	130		0,088			0,13	0,52	11,5	46,5	1,18	39	114	47	34
Irénée (Louvât et al., 1997)	L2	1226-8X-0039	02-94	37,7	nd	6,50	2775	353	7,6	171	103		1884	112	143				1,72	4,6	10,2	46,9	0,72				47	35
Irénée (cette étude)	CILA3	1226-8X-0039	24/10/00	37,8	2,0	5,98	2845	369	8,1	185	111	3,2	1903	105	155	8,8	0,125	< 0,1	< 0,1	1,63	5,0	10,0	51,0	2,41			46	37
Véronique (établissement thermal, BRGM)		1226-8X-0064	09/04/82	19,8	nd	6,25		238	5,3	111	71	3,0	1293	55	110													
Véronique (établissement thermal, BRGM)		1226-8X-0064	10/04/86	20,0	nd	6,50		256	6,8	120	87	2,0	1294	75	53													
Véronique (établissement thermal, BRGM)		1226-8X-0064	04/11/86	32,0	nd	6,40		255	6,2	130	78	2,6	1450	66														
Véronique (établissement thermal, BRGM)		1226-8X-0064	11/05/87	28,0	nd	6,55		215	5,7	185	18	4,0	1183	58	15													
Véronique (établissement thermal, BRGM)		1226-8X-0064	01/03/88	29,0	nd	6,70		251	6,1	160	73	4,0	1415	71	128													
Véronique (Iundt et al., 1992)		1226-8X-0064	07/92	29,2	2,8	6,04		216	4,8	115	80	4,0	1190	57	112	4,7	0,085	< 0,1	< 0,1	0,81	< 5	< 100		1,31	47	54	45	
Véronique (Louvât et al., 1997)	L3	1226-8X-0064	08-93	29,5	nd	6,20	2098	242	5,4	127	77	2,8	1457	71	116		0,056			0,51	0,40	6,6	32,7	1,11	50	88	45	37
Véronique (Louvât et al., 1997)	L4	1226-8X-0064	02-94	29,6	nd	6,20	2014	238	5,4	128	81		1381	65	115				1,24	3,3	6,0	32,8	1,06				44	39
Véronique (cette étude)	CILA4	1226-8X-0064	24/10/00	30,3	3,7	5,36	2116	250	5,7	143	91	2,5	1435	66	118	6,4	0,085	< 0,1	< 0,1	1,24	< 5	6,0	46,0	7,59			44	42
Aval sentier Taïbit (Bras rouge)	LS4	1226-8X-0040	31/12/69	40,2	0,45																							
Aval sentier Taïbit (Bras rouge)	LS4	1226-8X-0040	21/06/78	42,0	suintement	6,70	1457	238	11,0	82	41	26,0	818	136	100	0,50	1,20	2,3	0,03	0,70		150	70,0	0,20	22	9,2	22	1,6
Jacqueline (Louvât et al., 1997)	L5		08-93	47,5	nd	6,70	1660	289	11,9	62	35	3,0	933	173	152					0,53	30,5	183	88,7	0,23		95	24	1,6
Jacqueline (Louvât et al., 1997)	L6		02-94	48,0	nd	6,40	1818	304	12,7	78	42	3,0	1020	206	150					0,67	29,4	177	95,5	0,49	2	101	24	1,7
Aval sentier Taïbit ou Jacqueline (cette étude)	CILA6	1226-8X-0040	25/10/00	36,3	0,78	6,32	1596	249	9,8	62	32	23,0	707	199	125	0,23	1,50	2,7	< 0,1	0,44	33,0	178	80,0					
Dr Manès (établissement thermal, BRGM)	BR2	1226-8X-0065	15/10/80	20,0		6,43		298	6,1	149	90	3,6	1690	74	129													
Dr Manès (établissement thermal, BRGM)	BR2	1226-8X-0065	10/04/86	20,0		6,70		350	7,3	150	105	2,0	1708	100	142													
Dr Manès (établissement thermal, BRGM)	BR2	1226-8X-0065	04/11/86	32,2	nd	6,40	2267	276	7,0	159	97	2,9	1650	75										0,80				
Dr Manès (Iundt et al., 1992)	BR2	1226-8X-0065	07/92	30,1	0,78	6,00		263	6,0	135	85	4,7	1373	72	126	6,00	0,113	< 0,1	< 0,1	1,19	< 5	< 100		1,66	42	56	44	
Dr Manès (cette étude)	CILA2	1226-8X-0065	24/10/00	31,0	0,14	5,33	2405	296	6,5	160	99	2,6	1626	81	128	7,47	0,101	< 0,1	< 0,1	1,37	< 5	7,0	40,0	9,21	26	114	46	42,3

Evolution de la composition chimique, en fonction du temps, des eaux des sources thermales du cirque de Cilaos dans l'île de la Réunion.

ANNEXE 6

Procédures d'analyses des gaz (CO₂, CH₄, O₂, He, Rn) dans les sols

Procédures d'analyses des gaz (CO₂, CH₄, O₂, He, Rn) dans les sols

1 - GÉNÉRALITÉS

L'échantillonnage doit se faire à la pression atmosphérique afin d'éviter des calculs de corrections sur les mesures de gaz obtenues. Une analyse de gaz simultanée permet de travailler à pression atmosphérique constante et est donc recommandée, quand cela est possible. Le choix d'une profondeur identique de prélèvement pour un même profil (profondeur conseillée 50 cm) contribue à une meilleure comparaison des résultats.

En fonction de l'accessibilité et donc de la disponibilité de courant pour le perforateur, on installe, dans le sol, soit des tubes en carton, soit des cannes de prélèvement en acier dont l'étanchéité en surface est assurée par un joint torique, et qui sont enfoncées à l'aide d'une masselotte. En ce qui concerne les tubes en carton, il ne faut pas oublier d'assurer une bonne étanchéité périphérique en surface en humidifiant le tube. La mesure et/ou le prélèvement ne doivent être effectués que 24 h, au minimum, après la réalisation du trou pour que le sol retrouve des caractéristiques non perturbées.

Dans la mesure où l'on travaille en relatif (recherche d'anomalies de gaz), une très grande précision des mesures n'est pas exigée. Par contre, il est intéressant de pouvoir analyser sur site plusieurs gaz, à la fois.

2 - ANALYSE DU DIOXYDE DE CARBONE, DU MÉTHANE ET DE L'OXYGÈNE

Les mesures de ces trois gaz se font par infra-rouge. L'appareil est un LFG 20 TELEGAN portable, qui donne simultanément les mesures des gaz en % de volume. La précision analytique est de 0,5 % pour CO₂ et CH₄ et de 0,4 % pour O₂.

Le CO₂, le CH₄ et le O₂ sont toujours analysés sur site. La pompe interne du LFG 20 sert également à remplir les fioles à scintillation pour les analyses de radon et à alimenter le spectromètre ou à remplir un sac téflon « Tedlar », en cas d'absence du spectromètre sur site, pour les analyses d'hélium. Le schéma du dispositif de prélèvement et de mesures est présenté à la fin de cette annexe.

Le zéro de l'appareil est fait, soit avec du N₂ pur ou mieux encore, avec un mélange N₂/CO₂ à 80/20 %. Le réglage de la valeur en oxygène (20,9 %) se fait à l'air libre avant la connexion avec la canne de prélèvement pour s'affranchir des variations de la pression atmosphérique. L'étalonnage en CO₂ et CH₄ est réalisé au laboratoire avec un étalon de 20 % et un étalon de 50 ou 100 %, dans des sacs soumis à la pression atmosphérique.

Les mesures sont directement lues sur l'appareil après stabilisation. Pour éviter les incertitudes dues à la dérive de l'appareil, une vérification des taux en O₂, CO₂ et CH₄ de l'air ambiant est faite avant et après la connexion sur la canne de prélèvement.

3 - ANALYSE DE L'HÉLIUM

Dans l'optique de reconnaître des structures potentiellement favorables à la géothermie, les compléments d'exploration réalisés dans les cirques de Salazie et de Cilaos ont permis d'identifier sur le terrain les principaux éléments géologiques suivants :

- des intrusions de type dyke ou sill ;
- des corps intrusifs de grande dimension ;
- des joints minéralisés ou secs affectant les océanites ou les intrusions ;
- des failles en nombre très limité, surtout décrochantes à Cilaos ;
- des évidences de paléo-perméabilités (dépôts hydrothermaux) et des sources ou suintements de surface caractérisés par des débits faibles à négligeables.

L'hélium est analysé au moyen d'un spectromètre de masse ALCATEL, type ASM 100. La précision analytique est de 0,02 ppm. Le spectromètre de masse est mis en marche au minimum 20 à 30 mn avant d'effectuer les mesures afin d'obtenir un bon vide et donc une bonne stabilité de la mesure. Le branchement He est latéral par rapport au flux de gaz pour minimiser les perturbations liées aux variations de débit de la pompe du LFG20.

Que l'analyse se fasse en direct ou après prélèvement dans un sac téflon, le protocole analytique est le même. On fait d'abord circuler du N₂ (ou un autre gaz dépourvu d'hélium) à travers l'analyseur CO₂ et le spectromètre afin d'obtenir, sur l'enregistreur papier ou sur le métrix, le zéro de l'appareil. Quand le LFG 20 indique zéro en oxygène, on peut régler le zéro en hélium du spectromètre. Ensuite, la mesure dans l'air ambiant permet de se caler sur la valeur en hélium atmosphérique de 5,24 ppm. L'idéal est alors de régler le potentiomètre de gain du spectromètre sur 52,4 mV. L'utilisation d'un étalon de 20 ppm est recommandée mais non indispensable.

L'étalonnage de l'appareil étant terminé, on peut passer l'échantillon. Lorsqu'on a atteint une bonne stabilité de la mesure en CO₂ sur le LFG 20, on peut alors noter la valeur en hélium mesurée. Avant et après chaque passage d'échantillon, il est recommandé de se connecter sur l'air afin de pouvoir corriger le résultat obtenu de la dérive de l'appareil.

4 - ANALYSE DU RADON

Le radon est analysé au moyen d'un compteur à scintillation de particules alpha. Le gaz est introduit dans des fioles spéciales (sulfure de zinc dopé à l'argent) pour permettre l'exécution du comptage. Compte tenu de la période extrêmement faible de cet élément, le comptage doit se faire impérativement entre trois et six heures après le prélèvement.

Les fioles à scintillation sont laissées à l'air libre au moins une nuit avant un prélèvement. De plus, une fiole ayant été mouillée intérieurement, doit être écartée.

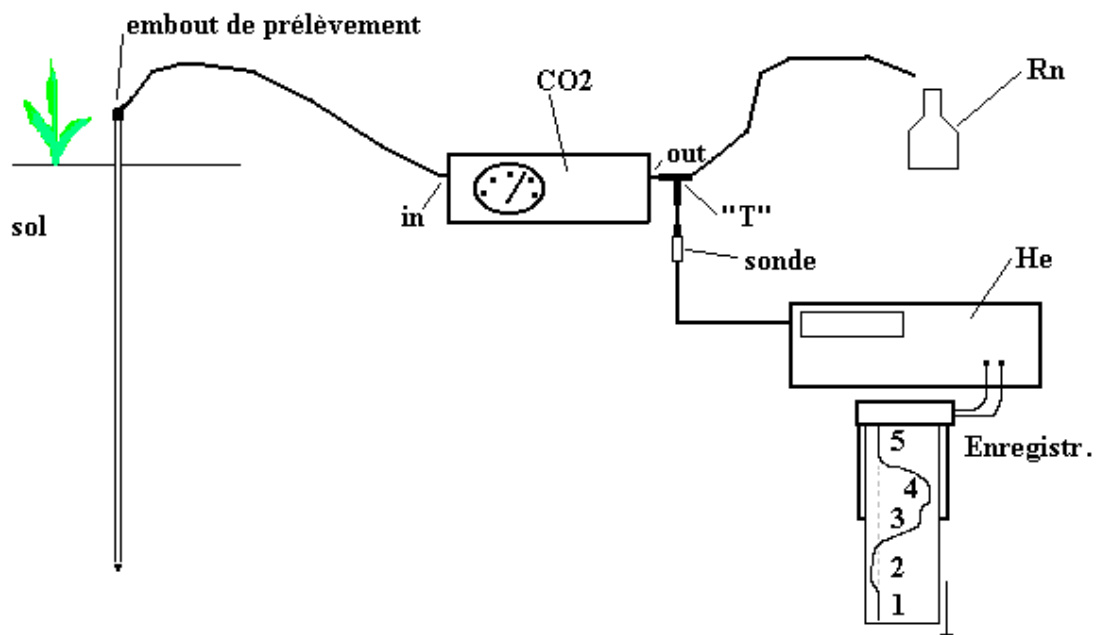
Avant prélèvement, le vide doit être fait à l'intérieur de la fiole au moyen d'un dispositif connecté à une pompe à vide à main. Quand la stabilité du circuit de prélèvement est atteinte (stabilisation de la valeur de CO_2 mesurée sur le LFG 20), on connecte en bout de circuit l'aiguille hypodermique qui va servir à introduire l'échantillon de gaz dans la fiole. Le septum de cette fiole est traversée par l'aiguille. On attend alors la remontée complète en pression de la fiole, à l'aide du manomètre de la pompe à vide, puis on pompe tranquillement une quinzaine de fois. La pompe à vide est déconnectée puis la partie amont de la fiole est désolidarisée du circuit sans retirer l'aiguille du septum afin de faire remonter l'intérieur de la fiole à la pression atmosphérique. L'heure du prélèvement est notée afin de ne pas oublier de faire le comptage entre 3 et 6 heures après le prélèvement.

Le comptage est réalisé sur cent secondes (moins, on perd de la précision et plus, on perd du temps). Il convient de bien choisir l'échelle de comptage en fonction de la concentration en radon.

Attention : il est impératif, soit d'éteindre complètement l'appareil, soit de débrancher le cordon du scintillateur avant d'ouvrir l'enceinte de comptage. Dans le cas contraire, le photomultiplicateur sera hors service.

Remettre le compteur à zéro puis commencer le comptage. L'expression des résultats se fera selon la formule : $1 \text{ cp/s} = 120 \text{ pCi/l}$.

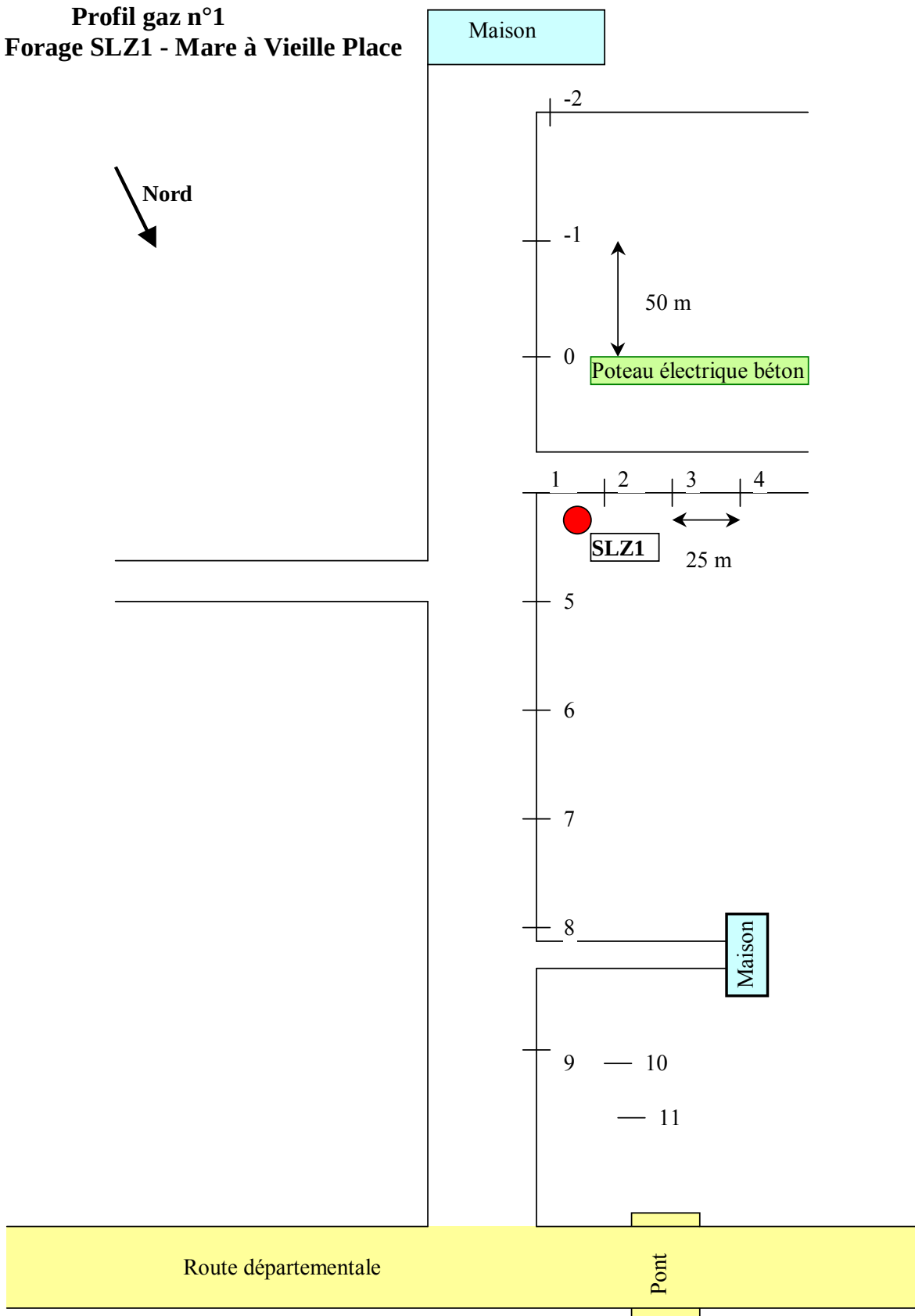
Schéma du dispositif de prélèvement et de mesure des gaz



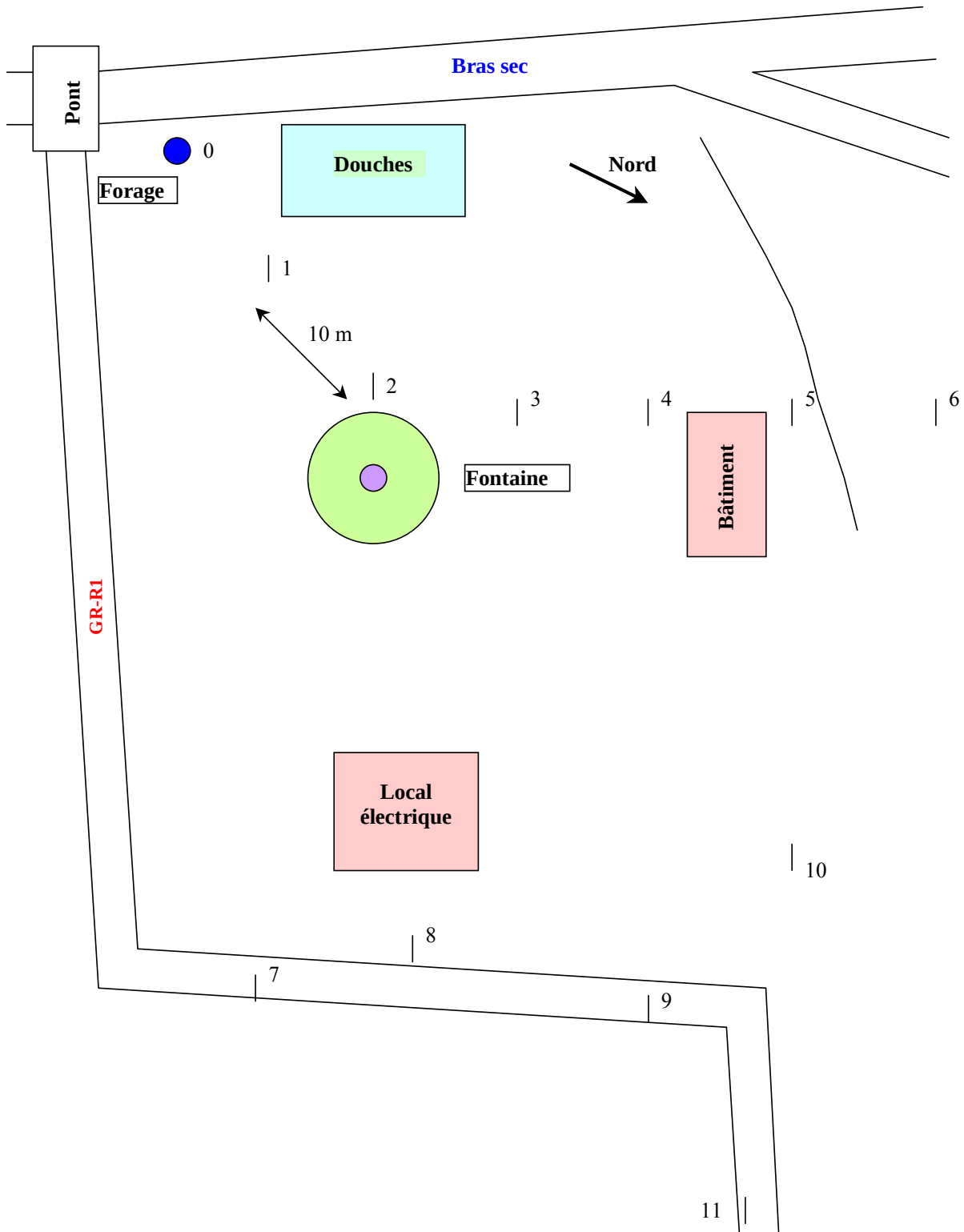
ANNEXE 7

**Carte de situation des onze profils de mesures
des teneurs en gaz dans les sols réalisés
en juin-juillet 2001**

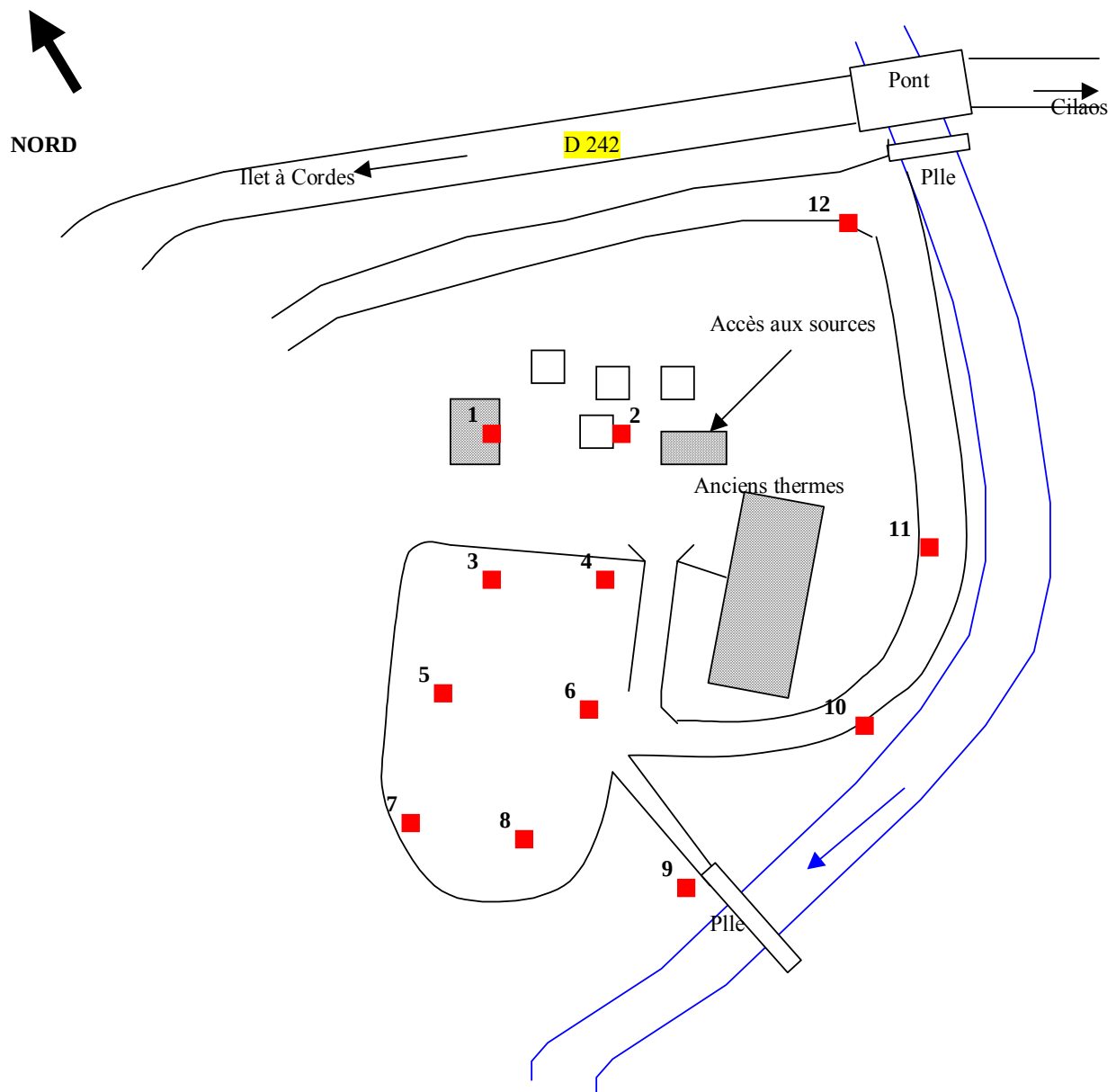
Profil gaz n°1
Forage SLZ1 - Mare à Vieille Place

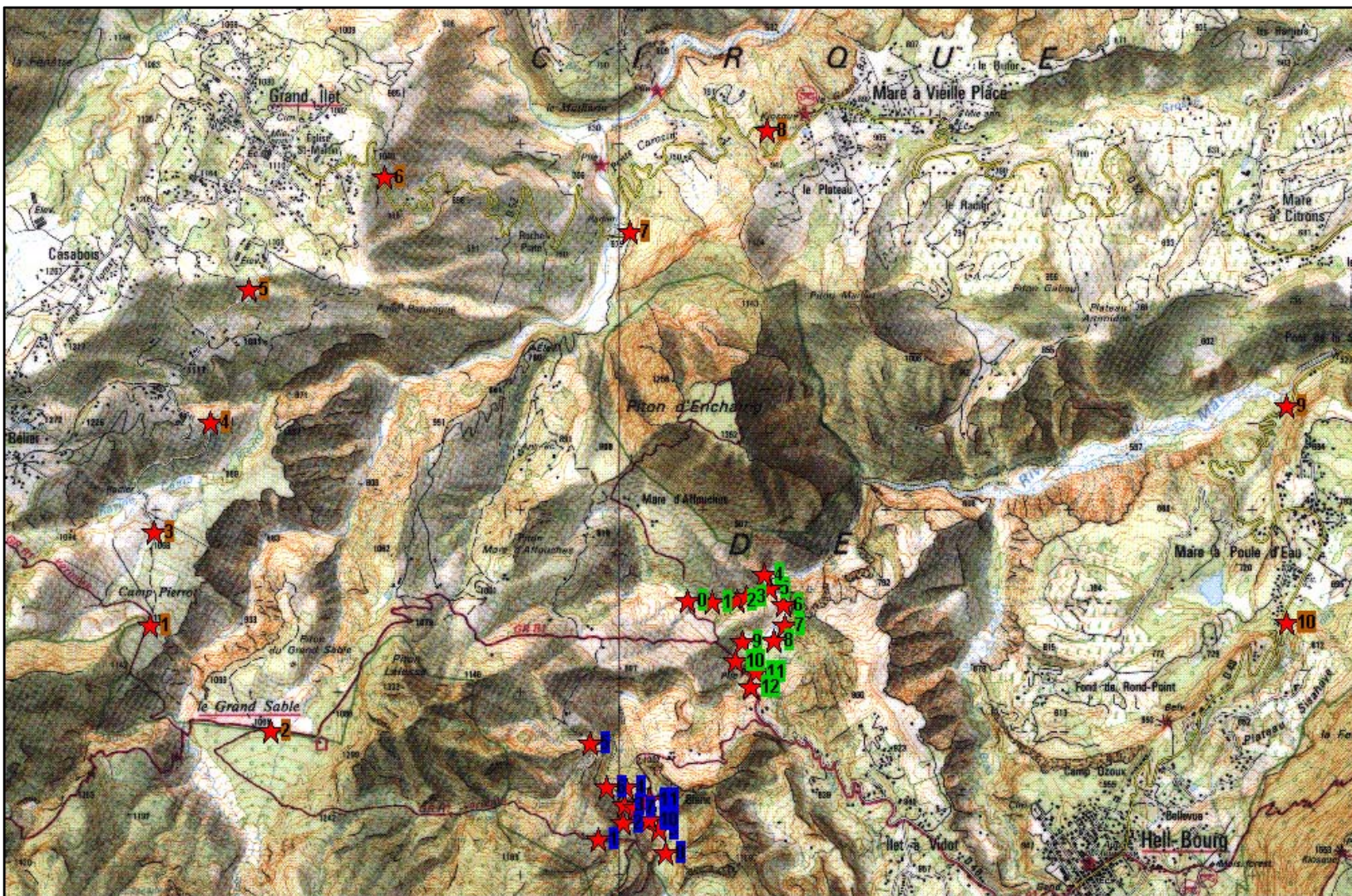


Profil gaz n°2
Anciens thermes d'Hell-Bourg

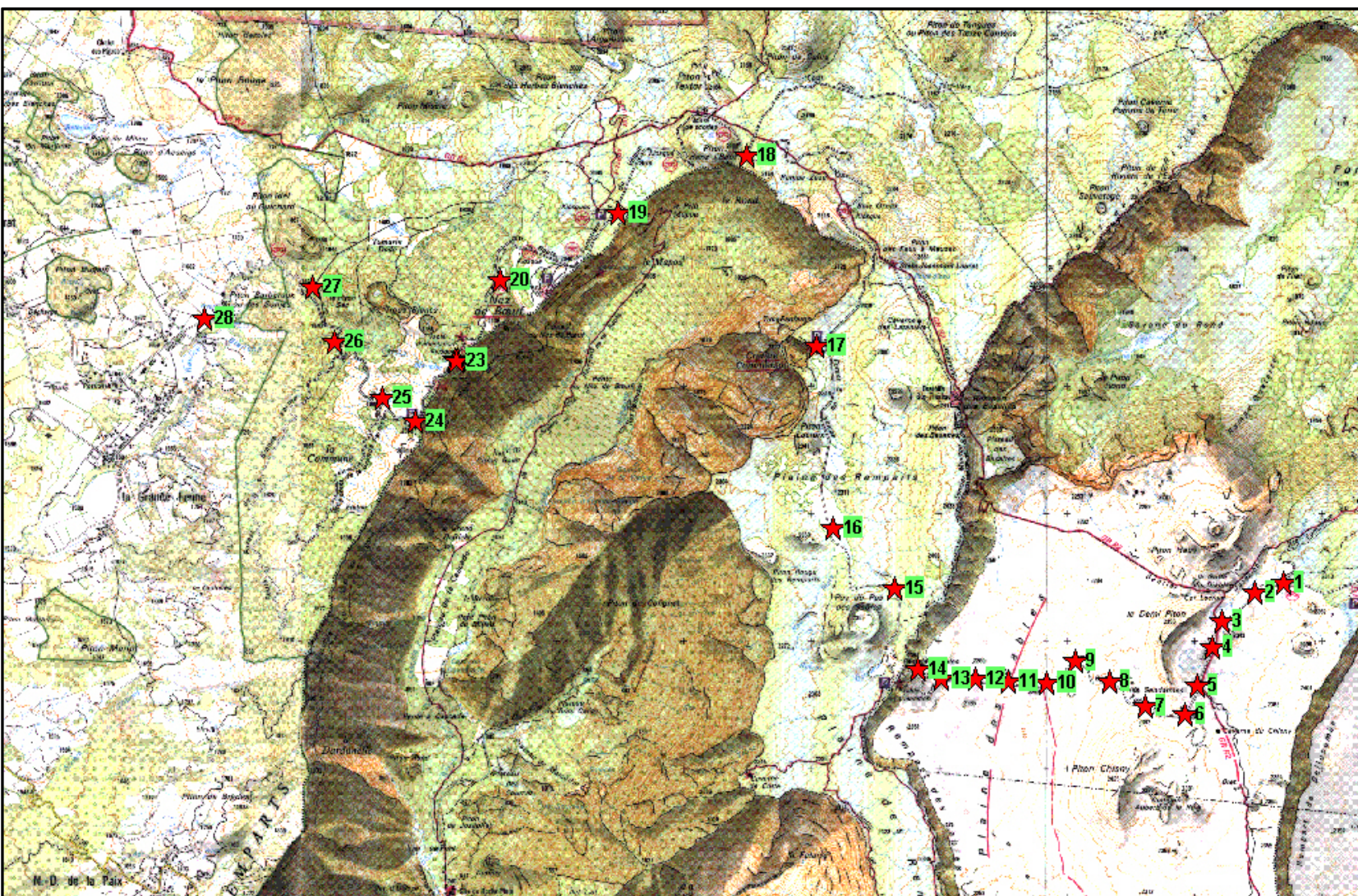


Profil gaz n°11
Anciens thermes de Cilaos

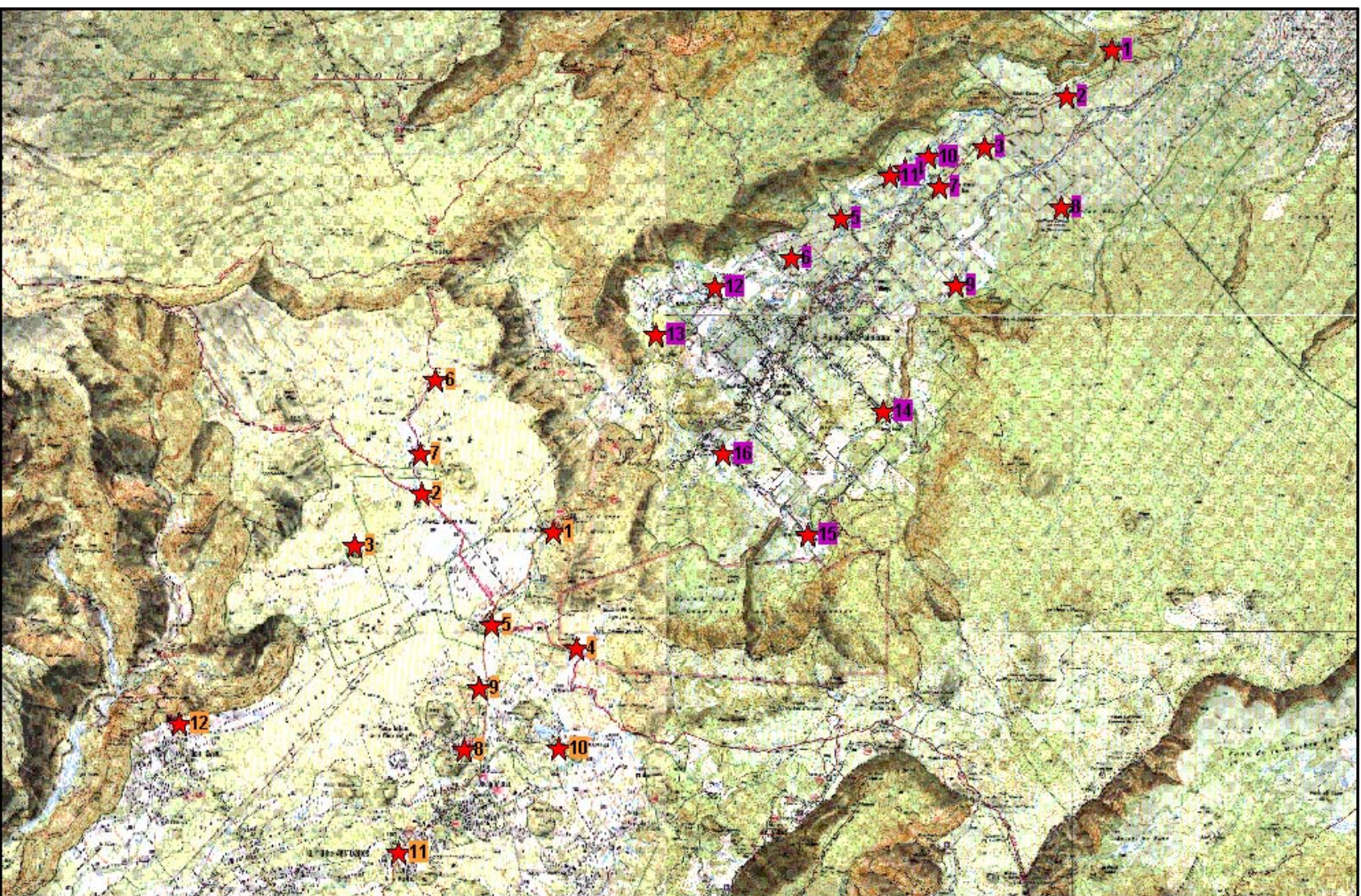




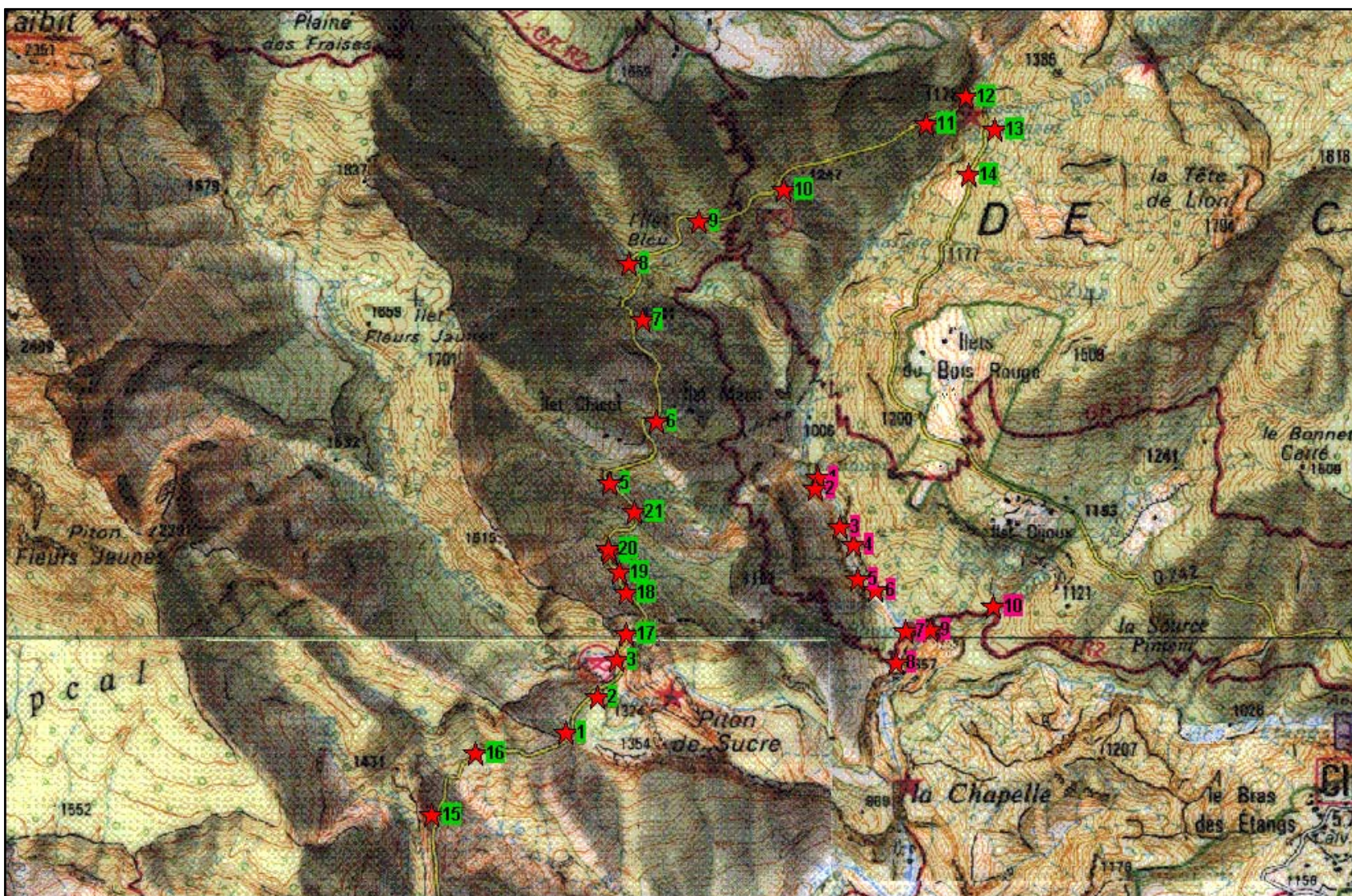
Profils n° 1 (site SLZ1 - mare à Vieille Place) - profil n° 3 (site ravine Olivette - rivière Mât) - profil n° 4 (site camp Pierrot - mare à Poule d'eau) - profil n° 5 (Trou Blanc).



Profil n° 6 (site plaine des Sables - plaine des Remparts - Nez de Bœuf).



Profils n° 7 et n° 8 (site plaine des Palmistes - site plaine des Cafres).



Profils n° 9 et n° 10 (site route d'Ilet à Cordes - Bras Rouge).

ANNEXE 8

Résultats des analyses chimiques et isotopiques des gaz dans les sols obtenus au cours de la campagne de profils de mesures réalisées en juin-juillet 2001

N° échantillon	Mode de prélèvement	Date prélèvements	Heure de prélèvements et de mesures	CO ₂ %	CH ₄ %	O ₂ %	Mesure du Rn			He ppm	Remarques
							Heure	cp/s	pCi/l		
-2	Tube en carton	23/06/01	10:24	0,2	0,0	20,6	14:32	0,11	13	?	sac prélèv. He vide
-1	Tube en carton	23/06/01	10:50	0,9	0,0	19,9	14:35	0,85	102	5,24	
0	Tube en carton	23/06/01	11:06	0,1	0,0	20,4	14:38	0,06	7	5,24	
1	Tube en carton	23/06/01	10:08	0,3	0,0	20,1	14:29	0,14	17	5,24	
2	Tube en carton	23/06/01	09:55	0,0	0,0	20,6	14:26	0,04	5	5,42	
3	Tube en carton	23/06/01	09:45	0,4	0,0	20,0	14:20	0,06	7	5,70	
4	Tube en carton	23/06/01	09:30	1,0	0,0	19,3	14:23	0,60	72	5,24	
4	Tube en carton	25/06/01	12:12	1,1	0,0	19,3	17:20	0,40	48	5,24	
5	Tube en carton	23/06/01	12:11	0,1	0,0	19,9	17:46	0,10	12	n.d.	
6	Tube en carton	23/06/01	11:25	0,5	0,0	19,9	14:45	0,96	115	5,24	
7	Tube en carton	23/06/01	11:39	0,1	0,0	20,1	14:50	0,06	7	5,24	
8	Tube en carton	23/06/01	11:53	0,8	0,0	19,4	14:57	1,90	228		
8	Tube en carton	25/06/01	12:24	1,0	0,0	19,4	17:44	1,33	160	5,24	
9	Tube en carton	23/06/01	12:20	0,1	0,0	20,0	17:43	0,48	58	5,24	
10	Tube en carton	23/06/01	12:32	1,0	0,0	18,9	17:54	0,53	64	5,27	
11	Tube en carton	23/06/01	12:42	0,5	0,0	19,5	17:57	0,10	12	5,24	

Résultats profil n° 1 (site SLZ1 - mare à Vieille Place, 22-23/06/2001).

N° échantillon	Mode de prélèvement	Date prélèvements	Heure de prélèvements et de mesures	CO ₂ %	CH ₄ %	O ₂ %	Mesure du Rn			He ppm	Remarques
							Heure	cp/s	pCi/l		
0	tube en carton	23/06/01	15:30	0,9	0,0	19,9	18:40	0,24	29	5,23	sac prélèv. He vide
1	tube en carton	23/06/01	15:40	0,3	0,0	20,5	18:42	0,24	29	5,24	
2	tube en carton	23/06/01	15:55	0,3	0,0	20,5	18:45	0,34	41	5,24	
3	tube en carton	23/06/01	16:05	0,1	0,0	20,5	21:35	0,04	5	?	
4	tube en carton	23/06/01	16:15	0,6	0,0	20,0	21:40	0,19	23	5,24	tube enlevé
5	tube en carton	23/06/01	16:25	0,2	0,0	20,1	21:42	0,03	4	5,24	
6	tube en carton	23/06/01	16:35	0,4	0,0	20,1	21:45	0,17	20	5,24	
7	tube en carton	23/06/01	17:21	0,1	0,0	20,3	22:00	0,06	7	5,27	tube cassé
8	tube en carton	23/06/01	17:10	0,3	0,0	20,1	21:56	0,04	5	5,24	
9	tube en carton	23/06/01	17:03	0,4	0,0	20,1	21:52	0,14	17	5,24	
10	tube en carton	23/06/01	16:45	0,9	0,0	19,7	21:47	0,15	18	5,24	
11	tube en carton	23/06/01	16:55	0,3	0,0	19,9	21:50	0,19	23	5,27	

Résultats profil n° 2 (site anciens thermes de Hell-Bourg, 22-23-26/06/2001).

N° échantillon	Nom	Coordonnées		Mode de prélèvement	Date prélèvements	Heure prélèvements Rn, He	CO ₂ %	CH ₄ %	O ₂ %	Mesure du Rn			He ppm	Remarques
		X	Y							Heure	cp/s	pCi/l		
0	Rav. Olivette (RO)/GR-R1	156905,46	58505,32	canne inox	24/06/01	09:40	0,1	0,0	20,7	15:32	0,30	36	5,24	
1	Sce thermale RO amont	157039,41	58500,92	canne inox	24/06/01	10:34	0,0	0,0	20,8	15:35	0,00	0	5,24	
2	Sce thermale RO aval	157175,56	58507,51	canne inox	24/06/01	11:10	0,0	0,0	20,8	17:10	0,00	0	5,24	canne enfoncée de 20 cm
3	Amont éboulis RO	157228,26	58529,46	canne inox	24/06/01	12:00	0,1	0,0	20,5	17:16	0,11	13	5,24	
4	Riv. Mât à 100m RO (face à cascade)	157322,68	58650,24	canne inox	24/06/01	13:03	0,3	0,0	19,1	17:19	0,05	6	5,24	sous des pins
5	Riv. Mât face à RO	157351,23	58573,38	canne inox	24/06/01	13:21	0,4	0,0	18,6	17:23	0,18	22	5,24	canne enfoncée de 30 cm, sous des pins
6	Sces thermales Riv. Mât	157432,48	58485,55	canne inox	24/06/01	14:09	0,9	0,0	18,6	17:26	1,02	122	5,35	canne enfoncée de 30 cm, pas de végétation
7	Riv. Mât à 150 m sces thermales (travertins calcaires)	15439,07	58373,56	canne inox	24/06/01	14:58	2,4	0,0	15,6	18:32	0,67	80	5,24	canne enfoncée dans le sable
7	Riv. Mât à 150 m sces thermales (travertins calcaires)	15439,07	58373,56	canne inox	25/06/01	15:21	2,7	0,0	15,3					échantillonnage pour mesure ¹³ C dans CO ₂
8	Riv. Mât proche Bras Marron	157375,39	58292,31	canne inox	25/06/01	15:05	0,2	0,0	19,4	19:15	0,17	20	5,24	
9	Riv. Mât rive opposée, proche du pont suspendu	157208,50	58283,53	canne inox	25/06/01	15:39	2,9	0,0	15,6	19:06	0,47	56	5,30	canne enfoncée dans le sable
10	Au bout du pont suspendu, sentier Piton d'Enchaing	157171,16	58175,92	canne inox	25/06/01	16:02	0,5	0,0	17,1					canne peu enfoncée
11	Sentier descendant vers riv. Mât	157276,57	58118,83	canne inox	25/06/01	16:14	0,7	0,0	17,1	19:17	0,40	48	5,24	canne enfoncée de 30 cm
12	Faïlle sentier GR-R1, près parking	157252,41	58037,58	canne inox	25/06/01		0,3	0,0	17,2					

Résultats profil n° 3 (site ravine Olivette - rivière du Mât, 24-25/06/2001).

N° échantillon	Nom	Coordonnées		Mode de prélèvement	Date prélèvements	Heure prélèvements Rn, He	CO ₂ %	CH ₄ %	O ₂ %	Mesure du Rn			He ppm	Remarques
		X	Y							Heure	cp/s	pCi/l		
1	Camp Pierrot (début GR)	153967,03	58374,36	canne inox	25/06/01	09:32	2,5	0,0	18,3	13:45	1,05	126	5,25	
2	Grand Sable (GR-R1)	154626,48	57797,88	canne inox	25/06/01	10:09	1,7	0,0	19,1	13:50	1,00	120	5,24	
3	Début route Grand Ilet	153988,86	58880,95	canne inox	25/06/01	10:52	2,8	0,0	18,0	13:55	0,53	64	5,24	
4	Route Grand Ilet 1	154298,94	59483,63	canne inox	25/06/01	11:02	1,4	0,0	19,4					
5	Route Grand Ilet 2	154508,57	60208,60	canne inox	25/06/01	11:12	0,3	0,0	20,5					
6	Route Grand Ilet 3	155251,00	60820,02	canne inox	25/06/01	11:22	1,1	0,0	19,7					
7	Forage de gradient thermique Roche Plate	156591,74	60523,04	canne inox	25/06/01	11:37	1,3	0,0	19,5	17:15	0,40	48	5,23	
8	Route avant kiosque Mare à Vieille Place	157338,54	61082,05	canne inox	25/06/01	11:56	0,7	0,0	20,1					
9	Route Salazie-Mare à Poule d'eau	160181,62	59575,34	canne inox	25/06/01	18:25	0,9	0,0	19,9					
10	Sortie Mare à Poule d'eau	160181,62	58387,46	canne inox	25/06/01	18:35	0,6	0,0	20,2					

Résultats profil n° 4 (site camp Pierrot – mare à Poule d'eau, 25/06/2001).

N° échantillon	Nom	Coordonnées		Mode de prélèvement	Date prélèvements	Heure prélèvements Rn, He	CO ₂ %	CH ₄ %	O ₂ %	Mesure du Rn			He ppm	Remarques
		X	Y							Heure	cp/s	pCi/l		
1	GR-R1 vers Grand Sable	156418,12	57205,02	canne inox	26/06/01	09:37	0,6	0,0	20,2	15:22	0,50	60	5,32	canne enfoncée de 30 cm
2	GR-R1, près de source ferrugineuse	156553,68	57295,98	canne inox	26/06/01	09:56	0,8	0,0	20,0	15:27	0,05	6	5,24	canne enfoncée de 25 cm
3	Sources à dépôts Riv. Mât	156562,61	57388,74	canne inox	26/06/01	10:41	0,0	0,0	20,8					
4	Riv. Mât, rive gauche	156567,96	57490,42	canne inox	26/06/01	11:22	0,6	0,0	20,2	15:30	0,10	12	5,24	canne enfoncée de 20 cm
5	Sentier vers ravine Fouquet	156371,75	57725,87	canne inox	26/06/01	11:55	0,3	0,0	20,5					
6	Sentier vers ravine Fouquet, près Riv. Mât	145460,93	57486,84	canne inox	26/06/01	12:13	1,4	0,0	19,4	15:33	0,25	30	5,24	
7	Sentier GR-R1, avant Riv. Mât	156617,90	57379,82	canne inox	26/06/01	12:20	0,5	0,0	20,3					
8	Riv. Mât, rive droite	156783,80	57128,32	canne inox	26/06/01	13:12	0,3	0,0	20,5	18:21	0,02	2	5,24	canne enfoncée de 20 cm
9	Riv. Mât, rive droite, en face source ferrugineuse	156746,34	57258,53	canne inox	26/06/01	13:30	0,0	0,0	20,8					
10	Riv. Mât, rive droite, faille proche du GR-R1	156696,38	47310,25	canne inox	26/06/01	13:45	0,0	0,0	20,8					
11	Proche Trou blanc	156696,56	57424,48	canne inox	26/06/01	13:55	0,3	0,0	20,5					

Résultats profil n° 5 (site Trou Blanc, 26/06/2001).

Compléments d'étude géothermique dans l'île de La Réunion

N° échantillon	Nom	Coordonnées		Mode de prélèvement	Date prélèvements	Heure prélèvements Rn, He	CO ₂ %	CH ₄ %	O ₂ %	Mesure du Rn			He ppm	Remarques
		X	Y							Heure	cp/s	pCi/l		
1	Plaine des Sables, route Piton de La Fournaise n°1	175686,31	39466,61	canne inox	27/06/01	10:39	0,1	0,0	20,5	16:35	2,21	265	5,24	canne enfoncée de 20 cm, T _{ext} = 6,5°C
2	Plaine des Sables, route Piton de La Fournaise n°2, à 220 m du point n°1	175457,24	39387,06	canne inox	27/06/01	10:48	0,2	0,0	20,4					ravine à côté, T _{ext} = 6,5°C
3	Plaine des Sables, route Piton de La Fournaise n°3, à 300 m du point n°2	175205,88	39161,17	canne inox	27/06/01	10:53	0,0	0,0	20,6					T _{ext} = 6,5°C
4	Plaine des Sables, route Piton de La Fournaise n°4, à 250 m du point n°3	175129,52	38960,74	canne inox	27/06/01	11:03	0,0	0,0	20,6					T _{ext} = 6,5°C
5	Plaine des Sables, route Piton de La Fournaise n°5, à 300 m du point n°4	175014,99	38658,47	canne inox	27/06/01	11:10	0,0	0,0	20,6	17:10	0,03	4	5,24	intersection avec GR-R2, présence d'eau, T _{ext} = 6,5°C
6	Plaine des Sables, route Piton de La Fournaise n°6, à 300 m du point n°5	174909,99	38435,76	canne inox	27/06/01	11:18	0,0	0,0	20,6					présence d'eau, T _{ext} = 6,5°C
7	Plaine des Sables, route Piton de La Fournaise n°7, à 300 m du point n°6	174598,19	38502,57	canne inox	27/06/01	11:23	0,0	0,0	20,6					
8	Plaine des Sables, route Piton de La Fournaise n°8, à 320 m du point n°7	174327,75	38690,28	canne inox	27/06/01	11:25	0,0	0,0	20,6					présence d'eau, T _{ext} = 6,5°C
9	Plaine des Sables, route Piton de La Fournaise n°9, à 320 m du point n°8	174060,49	38852,55	canne inox	27/06/01	11:33	0,0	0,0	20,6					sortie virage, point 2284 m, présence d'eau, T _{ext} = 6,5°C
10	Plaine des Sables, route Piton de La Fournaise n°10, à 250 m du point n°9	173831,41	38687,10	canne inox	27/06/01	11:38	0,0	0,0	20,6					panneau, remier Riv. Langevin, présence d'eau, T _{ext} = 6,5°C
11	Plaine des Sables, route Piton de La Fournaise n°11, à 250 m du point n°10	173525,97	38690,28	canne inox	27/06/01	11:47	0,0	0,0	20,6	17:18	0,02	2	5,24	point de calage géophysiciens, présence d'eau, T _{ext} = 6,5°C
12	Plaine des Sables, route Piton de La Fournaise n°12, à 250 m du point n°11	173371,44	38712,56	canne inox	27/06/01	11:57	0,0	0,0	20,6					T _{ext} = 6,5°C
13	Plaine des Sables, route Piton de La Fournaise n°13, à 300 m du point n°12	173010,55	38712,56	canne inox	27/06/01	12:02	0,0	0,0	20,6	17:47	0,22	26	5,24	point 2261 m, T _{ext} = 6,5°C
14	Sortie Plaine des Sables, route Piton de La Fournaise n°14, paroi faille	172826,02	38785,74	canne inox	27/06/01	12:14	0,0	0,0	20,6	18:10	0,03	4	5,24	un peu d'eau, T _{ext} = 6,5°C
15	Plaine des Remparts, route Piton de La Fournaise n°1	172644,66	39418,88	canne inox	27/06/01	12:17	0,0	0,0	20,6					point 2360 m, T _{ext} = 6,5°C
16	Plaine des Remparts, route Piton de La Fournaise n°2, à 1,1 km du précédent	172164,23	39896,13	canne inox	27/06/01	12:34	0,2	0,0	20,3	18:20	3,40	408	5,24	T _{ext} = 6,5°C
17	Plaine des Remparts, entre parking et cratère Commerçon	172027,42	41321,51	canne inox	27/06/01	12:41	0,3	0,0	20,2					T _{ext} = 6,5°C
18	Plaine des Remparts, intersection route volcan et sentier Piton de l'eau	171480,18	42810,53	canne inox	27/06/01	13:30	0,4	0,0	20,2					T _{ext} = 6,5°C
19	Plaine des Remparts, intersection route volcan et sentier Riv. Remparts	170474,78	42361,91	canne inox	27/06/01	13:44	0,8	0,0	19,9	18:32	1,12	134	5,24	T _{ext} = 8°C
20	Intersection route du volcan - sentier cratère Nez de Boeuf	169552,10	41830,57	canne inox	27/06/01	13:48	0,7	0,0	20,1					T _{ext} = 8,5°C
21	Point de vue Riv. des Remparts (chemin opposé au côté point de vue)	169223,41	41210,30	canne inox	27/06/01	14:06	3,8	0,0	17,0	18:36	1,10	132	5,27	prélèvement pour analyse ¹³ C dans CO ₂ , T _{ext} = 8,5°C
21bis	Point de vue Riv. des Remparts (chemin opposé au côté point de vue)	169223,41	41210,30	canne inox	28/06/01	09:41	0,8	0,0	20,0	15:30	0,08	10	5,24	échantillonnage à côté du trou précédent, problème de pompage, sol "collant"
22	Point de vue Riv. des Remparts (plus loin dans le chemin, à environ 20 m)	169205,43	41208,75	canne inox	27/06/01	14:20	0,5	0,0	20,1					0% de CO ₂ du côté point de vue, T _{ext} = 8,5°C
23	Point de vue Riv. des Remparts (dans la ravine en bas du chemin, à 10 m)	169216,73	41202,59	canne inox	27/06/01	14:35	0,9	0,0	19,7					T _{ext} = 8,5°C
24	Nez de Boeuf, kiosque + rouleau compresseur	168890,88	40728,72	canne inox	27/06/01	14:41	1,8	0,0	19,0	18:42	5,44	653	5,15	T _{ext} = 8,5°C
25	Nez de Boeuf, retenue DFCEI	168635,96	40907,58	canne inox	27/06/01	14:53	0,0	0,0	20,8					T _{ext} = 8,5°C
26	Nez de Boeuf, sous les sapins, près route volcan, sud-ouest de Trou Blanc	168261,80	41347,52	canne inox	27/06/01	15:04	1,0	0,0	19,8	18:47	1,19	143	5,24	T _{ext} = 8,5°C
27	Nez de Boeuf, ouest de Trou Blanc, piste forestière côté Bourg Murat	168085,00	41775,13	canne inox	27/06/01	15:37	1,7	0,0	19,1	18:56	0,90	108	5,11	point 1825 m, anomalie CO ₂ très localisée, 0,2 % de CO ₂ du côté opposé piste, T _{ext} = 8,5°C
28	Nez de Boeuf, ouest du piton Dugain, près route volcan	167240,24	41535,32	canne inox	27/06/01	15:43	0,8	0,0	19,8					T _{ext} = 8,5°C

Résultats profil n° 6 (site plaine des Sables - plaine des Remparts - Nez de Boeuf, 27-28/06/2001).

N° échantillon	Nom	Coordonnées		Mode de prélèvement	Date prélèvements	Heure prélèvements Rn, He	CO ₂	CH ₄	O ₂	Mesure du Rn			He ppm	Remarques
		X	Y				%	%	%	Heure	cp/s	pCi/l		
1	RN3 - L'Echo	173397,72	52806,08	canne inox	28/06/01	11:02	1,6	0,0	19,2	15:27	0,68	82	2,50	T _{ext.} = 16,5°C
2	Intersection RN3 - sentier Morne de l'Etang	173747,60	52144,45	canne inox	28/06/01	11:16	4,3	0,0	16,5	15:34	1,96	235	5,24	à 1,1 km du point n°1, T _{ext.} = 16,5°C
3	1 ^{er} kiosque RN3 avant village	172568,19	51410,91	canne inox	28/06/01	11:38	1,7	0,0	19,1	15:40	0,20	24	5,24	à 1,4 km du point n°2,
4	Sentier Grand Bras Patience partant du chemin de l'Ambulance, tunnel de basalte, hydroxydes Fe	171426,19	51105,99	canne inox	28/06/01	12:17	10,1	0,9	4,7	15:32	1,43	172	5,14	prélèvement pour analyse ¹³ C dans CO ₂ , T _{ext.} = 16,5°C
5	Intersection Chemin d'Ambulance - sentier Cascade Biberon	170502,79	50395,47	canne inox	28/06/01	12:43	0,6	0,0	20,2					T _{ext.} = 16,5°C
6	Intersection Chemin d'Ambulance - sentier Bras Cabot (Bassin Cadet)	169789,39	49817,27	canne inox	28/06/01	13:06	5,2	0,0	5,3				5,45	T _{ext.} = 16,5°C
7	Intersection RN3 - radier (Premier village Les Bas)	171906,58	50844,21	canne inox	28/06/01	14:06	2,0	0,0	18,8				5,24	T _{ext.} = 16,5°C
8	Piton Carron - Ligne des 2000	173655,56	50553,69	canne inox	29/06/01	10:17	1,7	0,0	19,3	16:16	0,42	50	5,24	sol mouillé
9	Route Oméga - intersection avec ligne zéro	172156,85	49428,93	canne inox	29/06/01	10:44	2,2	0,0	19,6	16:20	0,60	72	2,34	sol mouillé
10	Vers Piton Camp de tête - ravine Léantine	171759,87	51281,46	canne inox	29/06/01	11:16	5,3	0,0	18,2	16:25	1,16	139	5,24	
11	Point coté 933 près de pépinière	171196,06	50996,68	canne inox	29/06/01	11:40	3,1	0,0	19,2	16:36	0,79	95	5,24	canne à 10 cm
12	Intersection Bras Canard - ravine Sèche	168693,40	49408,80	canne inox	29/06/01	12:15	1,5	0,0	19,5	18:10	0,28	34	5,24	
13	Point coté 1100 sur D55	167847,68	48727,03	canne inox	29/06/01	12:37	1,5	0,0	19,7	18:20	0,17	20	5,24	
14	Chemin Frémicourt - Point coté 1166	171112,64	47622,42	canne inox	29/06/01	13:56	3,4	0,0	17,4	18:25	1,12	134	5,24	
15	Village Bras Piton après radier - Ouest Piton Doret	170016,65	45850,42	canne inox	29/06/01	14:21	3,4	0,0	16,2	18:35	3,18	382	5,24	valeur CO ₂ fluctuante
16	Ligne des 4000 - Bras des Calumets	168805,59	47006,82	canne inox	29/06/01	14:37	2,0	0,0	18,9	18:40	0,85	102	5,24	

Résultats profil n° 7 (site plaine des Palmistes, 28-29/06/2001).

N° échantillon	Nom	Coordonnées		Mode de prélèvement	Date prélèvements	Heure prélèvements Rn, He	CO ₂ %	CH ₄ %	O ₂ %	Mesure du Rn			He ppm	Remarques
		X	Y							Heure	cp/s	pCi/l		
1	Col de Bellevue	166369,17	45897,76	canne inox	29/06/01	15:13	0,8	0,0	19,9	20:00	0,49	59	5,24	
2	Départ sentier Piton des Neiges - GRR 2	164487,51	46440,98	canne inox	29/06/01	15:33	1,9	0,0	17,8	20:10	5,70	684	5,31	
3	Flanc N du Piton Doret	163524,29	45698,97	canne inox	29/06/01	15:53	0,7	0,0	19,2	20:25	0,23	28	5,24	
4	Pied Piton Grand-mère - 1672 m NGR -	166702,37	44212,13	canne inox	29/06/01	16:15	0,9	0,0	19,8	21:25	1,20	144	5,24	
5	Pont de Trente - Intersection GR-R2/RN 3	165475,94	44559,34	canne inox	29/06/01	17:17	2,2	0,0	18,5	21:30	0,52	62	5,24	
6	Sentier de Bébourg à 1,6 km du point 2	164677,92	48067,82	canne inox	30/06/01	08:30	0,4	0,0	20,0	14:27	1,56	187	5,24	
7	Sentier de Bébourg à 500 m du point 2	164459,51	47006,60	canne inox	30/06/01	08:49	1,1	0,0	19,6	14:31	5,05	606	5,27	
8	La Diligence - N Piton Desforges	165086,73	42764,49	canne inox	30/06/01	09:12	0,4	0,0	20,3	14:36	0,13	16	5,24	
9	Carrière NE Piton Villers - 200 m RN 3	165310,73	43640,91	canne inox	30/06/01	09:34	0,3	0,0	20,4	14:40	0,55	66	5,24	
10	Flanc S Piton du Milieu	166447,57	42772,89	canne inox	30/06/01	10:00	1,1	0,0	19,7	14:43	2,10	252	5,24	
11	Intersection Ch. D'Heurveiher/RN3	164143,10	41280,45	canne inox	30/06/01	10:25	0,1	0,0	19,9	14:45	0,12	14	5,24	
12	Horloge hydraulique - Point de vue Gd-Bassin	161004,22	43128,50	canne inox	30/06/01	10:48	2,6	0,0	18,7	14:48	6,83	820	5,24	

Résultats profil n° 8 (site plaine des Cafres, 29-30/06/2001).

N° échantillon	Nom	Coordonnées		Mode de prélèvement	Date prélèvements	Heure prélèvements Rn, He	CO ₂	CH ₄	O ₂	Mesure du Rn			He	Remarques
		X	Y				%	%	%	Heure	cp/s	pCi/l	ppm	
1	PM 0 m - gauche	151445,91	49716,29	tube carton	02/07/01	08:10	< 0,1	0,0	20,0	12:45	0,03	4	5,24	
2	PM 300 m - droite	151541,43	49822,30	tube carton	02/07/01	08:19	< 0,1	0,0	20,8	12:46	0,03	4	5,24	
3	PM 450 m - gauche	151594,49	49933,63	tube carton	02/07/01	08:25	0,2	0,0	20,4	12:49	0,13	16	5,24	
4	PM 820 m gauche	151575,91	50246,39	tube carton	02/07/01	08:40	17,0	0,0	14,6	12:52	2,00	240	5,85	zone fracturée et d'accumulation importante de sills basaltiques ; prélèvement ampoule gaz
5	PM 1230 m - gauche	151575,91	50453,14	tube carton	02/07/01	08:51	0,7	0,0	19,8	12:59	0,18	22	5,24	
6	PM 1590 m - droite	151713,87	50638,67	tube carton	02/07/01	09:00	0,3	0,0	20,5	12:56	0,55	66	5,24	
7	PM 1920 m - droite	151671,42	50935,54	canne inox	02/07/01	09:17	0,4	0,0	20,4	13:01	0,32	38	5,24	
8	PM 2200 m - gauche	151634,28	51105,16	tube carton	02/07/01	09:26	0,3	0,0	20,5	13:03	0,17	20	5,24	
9	PM 2510 m - droite	151841,21	51229,74	tube carton	02/07/01	09:40	0,1	0,0	20,6	13:05	0,25	30	5,24	
10	PM 2800 m - droite	152090,61	51322,51	canne inox	02/07/01	09:52	0,3	0,0	20,0	13:08	0,24	29	5,24	
11	PM 3280 m - droite	152512,44	51516,00	tube carton	02/07/01	10:02	0,0	0,0	20,8	16:06	0,10	12	5,24	
12	PM 3500 m - gauche avant pont sur Bras Rouge	152629,18	51598,17	tube carton	02/07/01	10:12	< 0,1	0,0	20,8	16:11	0,03	4	5,24	
13	PM 3600 m - gauche après pont du Bras Rouge	152716,73	51500,09	tube carton	02/07/01	10:22	0,2	0,0	20,7	16:16	0,06	7	5,24	
14	PM 3750 m - droite	152637,14	51367,57	tube carton	02/07/01	10:36	0,2	0,0	20,3	16:25	0,23	28	5,24	
15	PM -500 m - gauche	151050,60	49475,08	canne inox	03/07/01	08:30	< 0,1	0,0	17,6					
16	PM -300 m - gauche	151177,95	49657,97	canne inox	03/07/01	08:40	< 0,1	0,0	20,8					
17	PM +550 - gauche	151626,32	50010,49	canne inox	03/07/01	08:55	< 0,1	0,0	20,8					
18	PM +700 - gauche	151626,32	50132,42	canne inox	03/07/01	09:02	0,3	0,0	20,2					
19	PM +900 m - gauche	151602,44	50193,38	canne inox	03/07/01	09:09	20,8	0,0	16,2	09:16	1,90	228	6,26	zone fracturée et d'accumulation importante de sills basaltiques
20	PM +910 m - gauche	151573,26	50262,29	canne inox	03/07/01	09:26	31,0	0,0	11,8	09:26	5,04	605	7,75	"
21	PM +1050 m - gauche	151647,55	50370,97	canne inox	03/07/01	09:35	0,1	0,0	20,8					

Résultats profil n° 9 (site route d'Ilet à Cordes, 30/06 et 1/07/2001).

N° échantillon	Nom	Coordonnées		Mode de prélèvement	Date prélèvements	Heure prélèvements	CO ₂	CH ₄	O ₂	Mesure du Rn			He	Remarques
		X	Y				%	%	%	Heure	cp/s	pCi/l	ppm	
1	Rive gauche - Bassin Fouquet	152193,16	50473,01	canne inox	01/07/01	09:35	0,3	0,0	20,0	15:05	0,12	14	5,24	canne à 30 cm
2	Rive droite - au niveau de la source thermominérale	152185,20	50438,55	canne inox	01/07/01	09:50	< 0,1	0,0	20,8	15:15	1,45	174	5,24	
3	Rive droite - 50 m aval point 2	152256,83	50324,58	canne inox	01/07/01	10:09	0,5	0,0	20,3	15:20	0,16	19	5,29	
4	Rive gauche - 80 m aval point 3	152296,63	50274,21	canne inox	01/07/01	10:24	< 0,1	0,0	20,8	15:26	0,11	13	5,24	
5	Rive droite - 80 m aval point 4	152309,89	50170,84	canne inox	01/07/01	10:37	0,2	0,0	20,6	15:32	0,07	8	5,24	canne à 30 cm
6	Rive gauche - 50 m aval point 5	152362,95	50139,03	canne inox	01/07/01	10:48	< 0,1	0,0	20,8	15:40	0,02	2	5,24	
7	Rive droite - Intersection GR-R2 / Bras Rouge	152450,50	50017,12	canne inox	01/07/01	11:07	2,4	0,0	18,8	15:45	0,39	47	5,27	
8	GR R2 vers col du Taïbit - 1 ^{er} virage à droite	152423,97	49924,34	canne inox	01/07/01	11:18	0,4	0,0	20,5	15:53	0,52	62	5,24	
9	Rive gauche - casc. Bras Rouge - Source thermale Jacqueline	152524,79	50022,42	canne inox	01/07/01	11:35	0,3	0,0	20,5	15:58	0,10	12	5,24	
10	GR-R2 vers Cilaos - 100 m Bras Rouge	152710,50	50088,68	canne inox	01/07/01	11:49	0,3	0,0	20,5	16:04	0,25	30	5,24	

Résultats profil n° 10 (site Bras Rouge, 1/07/2001).

N° échantillon	Nom	Mode de prélèvement	Date prélèvements	Heure prélèvements Rn, He	CO ₂ %	CH ₄ %	O ₂ %	Mesure du Rn			He ppm	Remarques
								Heure	cp/s	pCi/l		
1	Aplomb source - cheminée	canne inox	02/07/01	13:40	0,7	0,0	20,1	17:56	0,14	17	6,12	
2	12 m du pt 1 vers descente cave	canne inox	02/07/01	13:47	0,3	0,0	20,5	18:00	0,17	20	5,24	
3	17 m sud du pt 1	canne inox	02/07/01	13:57	0,8	0,0	20,2	18:10	0,42	50	5,36	
4	10 m Est du pt 3 (au petit portail)	canne inox	02/07/01	14:04	3,1	0,0	19,0	18:06	0,87	104	5,62	
5	20 m sud du pt 3	canne inox	02/07/01	14:15	0,3	0,0	20,4	18:20	0,74	89	5,24	
6	10 m est du pt 5	canne inox	02/07/01	14:20	0,4	0,0	20,3	18:12	0,83	100	5,24	
7	20 m sud du pt 5	canne inox	02/07/01	14:28	0,2	0,0	20,6	18:22	0,80	96	5,24	
8	12 m est du pt 7	canne inox	02/07/01	14:36	0,2	0,0	20,6	18:27	1,22	146	5,24	
9	Passerelle aval rive droite	canne inox	02/07/01	14:43	0,2	0,0	20,6	18:30	0,18	22	5,24	
10	Long de rivière prolongement pt 9 et 6	canne inox	02/07/01	14:52	0,2	0,0	20,6	18:37	0,07	8	5,24	
11	Long de rivière prolongement pt 4 et 10	canne inox	02/07/01	15:00	< 0,1	0,0	20,7	18:40	0,03	4	5,24	
12	Passerelle amont rive droite	canne inox	02/07/01	15:07	0,2	0,0	20,6	18:45	0,53	64	5,24	

Résultats profil n° 11 (site des anciens thermes de Cilaos, 2/07/2001).

Echantillon	Unité	Incertitude	Point 7 du profil n°3 (Riv. Mât)	Point 21 du profil n°6 (Vue Riv. Remparts)	Point 4 du profil n°7 (Plaine des Palmistes)	Point 4 du profil n°9 (Route Ilet à Cordes)
Date de prélèvement			25/06/01	27/06/01	28/06/01	02/07/01
$\delta^{13}\text{C}$	‰	+/- 0,1‰	-22,7	-13,1	-17,1	-1,2
CO_2	% vol.	3%	2,7	3,8	13,8	19,1
O_2	% vol.	3%			5,72	16,2
N_2	% vol.	3%			77,4	63,0
Ar	% vol.	3%			0,95	0,75
He	% vol.	5%			< 0,005	< 0,005
H_2	% vol.	5%			< 0,005	< 0,005
H_2S	% vol.	3%			< 0,005	< 0,005
CH_4	% vol.	3%	0	0	0,65	< 0,0002
C_2H_6	% vol.	3%			< 0,0002	< 0,0002
C_3H_8	% vol.	3%			< 0,0002	< 0,0002
iso- C_4H_{10}	% vol.	3%			< 0,0002	< 0,0002
n- C_4H_{10}	% vol.	3%			< 0,0002	< 0,0002
$\Sigma\text{C}_4\text{H}_{10}$	% vol.	3%			< 0,0002	< 0,0002
$\Sigma\text{C}_5\text{H}_{12}$	% vol.	3%			< 0,0002	< 0,0002
$\Sigma\text{C}_6\text{H}_{14}$	% vol.	3%			< 0,0002	< 0,0002

Résultats des analyses chimiques et isotopiques réalisées sur quatre échantillons de gaz prélevés au cours de la campagne effectuée en juin-juillet 2001.

BRGM
SERVICE ANALYSE ET CARACTÉRISATION MINÉRALE
Unité Mesure in situ, expérimentation
BP 6009 - 45060 Orléans cedex 2 – France – Tél. : 33 (0)2 38 64 34 34